



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

**EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE TECNOLOGÍAS DE  
GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DEL OCÉANO A TRAVÉS DEL  
ENFOQUE DE CICLO DE VIDA**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA  
LEÓN LIRA MARÍA DEL ROSARIO

TUTOR PRINCIPAL  
DRA. LEONOR PATRICIA GÜERECÁ HERNÁNDEZ, II UNAM

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, Noviembre 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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:**

**Presidente:** Dr. César Valdez Enrique

**Secretario:** Dr. Moreno Andrade Iván

**Vocal:** Dra. Paredes Figueroa María Guadalupe

**1 er. Suplente:** Dr. Silva Casarín Rodolfo

**2 do. Suplente:** Dra. Güereca Hernández Leonor Patricia

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:  
Instituto de Ingeniería de la UNAM, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

**TUTOR DE TESIS:**

Dra. Leonor Patricia Güereca Hernández

-----  
**FIRMA**

# AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca de maestría que me permitió llevar a cabo este trabajo en el marco del Centro Mexicano de Innovación en Energías del Océano (CEMIE-Océano) financiado por el Fondo CONACYT-SENER / Sustentabilidad Energética con número de subvención 249495.

Agradezco profundamente a la Dra. Leonor Patricia Güereca Hernández, por aceptarme como parte de su grupo de trabajo (CiVICCS: Ciclo de Vida, Cambio Climático y Sostenibilidad). Por brindarme todo su apoyo y orientación, pero sobre todo por confiar en mí.

A mis compañeros dentro del CiVICCS (Adri, Carlos, Cris, Dani, Dr. Padilla, Dra. Paredes, Elena, Kelly, Kenia, Mary, Ximena) por recibirme y hacerme sentir en casa, pero sobre todo a Dora, Itzel y Sergio. Porque, Dora sin tu ayuda, cada semestre seguramente se me hubieran pasado todas las fechas de todos los trámites y este trabajo no estaría terminado. Itzel, que bueno volver a coincidir contigo, gracias por tu paciencia y disposición a ayudarme. Sergio, no tengo palabras para agradecerte, porque nunca dijiste que no en cada una de las incontables veces que necesité tu ayuda, ambos sabemos que este documento en gran parte esta terminado por tu incondicional ayuda.

Gracias a mi jurado, especialmente a la Dra. Guadalupe Paredes y al Dr. Rodolfo Silva, por acompañarme y compartirme su conocimiento a lo largo de los dos años de maestría. Sin duda este es un mejor trabajo porque los tuve a mi lado. A los doctores Enrique César e Iván Moreno, por ser parte de la etapa final y ayudarme a mejorar.

A todo aquel que estuvo presente durante estos dos años, gracias por su amor manifestado de diversas formas. Por último, pero siempre primero en mi vida, a mi familia por creer en mí más que yo misma, por siempre estirar las manos para atraparme si es que caigo, por jalarme para que nunca me quede atrás.

## DEDICATORIA

A la familia Lagunes Gómez. Porque yo sé que ese día de todo lo que se perdió, su pérdida no tiene comparación. Daría lo que fuera para que un trabajo para obtener un grado de maestría tuviera su nombre en la portada.

## CONTENIDO

Figuras.....	7
Tablas .....	10
Resumen.....	11
Abstract .....	12
1. INTRODUCCIÓN .....	13
1.1. Justificación del Proyecto.....	13
1.2. Objetivos .....	15
1.2.1. Objetivo General .....	15
1.2.2. Objetivos Específicos.....	15
2. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1. Fundamento Teórico .....	16
2.1.1. Energías Renovables .....	16
2.1.2. Energías del Océano.....	20
2.1.2.1. Energía Eólica Marina.....	25
2.1.2.2. Energía Undimotriz .....	28
2.1.3. Análisis de Ciclo de Vida.....	33
2.1.3.1. Definición de Objetivos y Alcance .....	34
2.1.3.2. Inventario de Ciclo de Vida.....	34
2.1.3.3. Evaluación de Impacto .....	35
2.1.3.4. Interpretación .....	37
2.2. Antecedentes .....	38
2.2.1. Impactos Ambientales de las Energías del Océano.....	38
2.2.1.1. ACV de Energía Eólica Marina.....	39
2.2.1.2. ACV de Energía Undimotriz.....	41
3. METODOLOGÍA .....	42
3.1. Definición de alcance .....	42
3.1.1. Función del Sistema y Unidad Funcional.....	42
3.1.2. Límites del Sistema .....	43
3.1.3. Descripción de los sistemas.....	43
3.1.3.1. Aerogenerador offshore.....	43
3.1.3.2. Boya con Brazo .....	48
3.1.3.3. Mutriku.....	51
3.2. Inventario de Ciclo de Vida .....	56
3.2.1. Aerogenerador Offshore.....	58
3.2.2. Boya con Brazo .....	58

3.2.3.	Mutriku.....	59
3.3.	Evaluación de Impacto.....	62
3.3.1.	Selección de Categorías de Impacto.....	62
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	63
4.1.	Inventario de Ciclo de Vida .....	63
4.1.1.	Aerogenerador Offshore.....	64
4.1.2.	Boya con Brazo .....	70
4.1.3.	Mutriku.....	75
4.2.	Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida e Interpretación .....	79
4.2.1.	Análisis General .....	79
4.2.1.1.	Aerogenerador Offshore.....	83
4.2.1.2.	Boya con Brazo .....	89
4.2.1.3.	Mutriku.....	95
4.2.2.	Evaluación de Impacto por Categoría .....	100
4.2.2.1.	Cambio Climático (CC) .....	100
4.2.2.2.	Agotamiento de la Capa de Ozono (AO) .....	106
4.2.2.3.	Acidificación Terrestre (AT).....	109
4.2.2.4.	Eutrofización Marina (EM).....	110
4.2.2.5.	Toxicidad Humana (TH) .....	112
4.2.2.6.	Formación de Material Particulado (FMP) .....	113
4.2.2.7.	Ecotoxicidad Marina (ETM) .....	114
4.2.2.8.	Agotamiento de los Recursos Minerales (AM) .....	116
4.2.2.9.	Agotamiento de los Combustibles Fósiles (ACF) .....	117
5.	CONCLUSIONES .....	119
5.1.	Futuras Líneas de Investigación.....	122
	REFERENCIAS.....	122

## FIGURAS

Figura 1: Distribución mundial de la capacidad mundial máxima de generación de las energías renovables (IRENA, 2020).....	19
Figura 2: Componentes principales de una turbina de viento (adaptado de Sanz, 2012a).....	26
Figura 3: Tipos de cimentación (adaptado de Oh et al., 2018). ....	27
Figura 4: Wavestar WEC, Dinamarca (Dalton et al., 2014).....	30
Figura 5: Central undimotriz Puerto Pecém, Brasil (Sanz, 2012b). ....	30
Figura 6: Generador de energía Undimotriz, Argentina (Jauregui et al., 2016).....	30
Figura 7: Funcionamiento típico de un sistema de extracción de energía undimotriz tipo OWC (D'aquino et al., 2019). ....	31
Figura 8: Turbina tipo Wells (adaptado de Soltanmohamadi y Lakzian, 2016).....	32
Figura 9: Arreglo típico de un sistema OWC en línea costera (adaptado de Falcão et al., 2017).....	33
Figura 10: Metodología de ACV (adaptado de ISO 14040, 2006).....	34
Figura 11: Método del punto medio (adaptado de Sonnemann y Vigon, 2011). ....	35
Figura 12: Etapas del ciclo de vida de dispositivos de energía del océano (adaptado de Paredes et al., 2019). ....	43
Figura 13: Esquema de ciclo de vida de un aerogenerador offshore.....	44
Figura 14: Características físicas de un aerogenerador offshore (adaptado de Dones et al., 2007; Vargas et al., 2015). ....	45
Figura 15: Esquema de ciclo de vida de una boya con brazo.....	48
Figura 16: Características físicas de un sistema undimotriz tipo boya con brazo (adaptado de Pinto, 2017; García et al., 2019). ....	50
Figura 17: Planta Undimotriz en Mutriku. España (Otaola et al., 2019).....	52
Figura 18: Esquema de ciclo de vida de la Planta Undimotriz de Mutriku, España. ....	52
Figura 19: Vista en planta de la Central de Energía Undimotriz de Mutriku, España (adaptado de Torre-Enciso et al., 2009; Aracelay, 2020). ....	53
Figura 20: Características físicas de la Planta de Energía Undimotriz Mutriku, España (adaptado de Torre-Enciso et al., 2009; Aracelay, 2020). ....	54
Figura 21: Bloques pre-fabricados (Torre-Enciso et al., 2009).....	60

Figura 22: Corte transversal camara de aire Planta Undimotriz Mutriku, España (Garrido et al., 2015). .....	61
Figura 23: Acero requerido a lo largo del ciclo de vida de un aerogenerador offshore. ....	70
Figura 24: Concreto requerido a lo largo del ciclo de vida de la planta de energía undimotriz de Mutriku, España. ....	79
Figura 25: EICV con resultados normalizados de los sistemas de generación de energía a través del océano estudiados.....	81
Figura 26: EICV de los materiales utilizados en cada uno de los sistemas de generación de energía a través del océano estudiados. ....	82
Figura 27: EICV Aerogenerador Offshore.....	85
Figura 28: EICV Etapa de Construcción Aerogenerador Offshore.....	86
Figura 29: EICV Sub-etapas dentro de la Etapa de Generación Aerogenerador Offshore. ....	87
Figura 30: EICV Etapa de Fin de Vida Aerogenerador Offshore. ....	88
Figura 31: EICV Brazo con Boya. ....	91
Figura 32: EICV Etapa de Construcción Brazo con Boya. ....	92
Figura 33: EICV Sub-etapa de Mantenimiento Brazo con Boya. ....	93
Figura 34: EICV Etapa de Fin de Vida Brazo con Boya.....	94
Figura 35: EICV Mutriku.....	96
Figura 36: EICV Etapa de Construcción Mutriku.....	97
Figura 37: EICV Sub-etapa de Mantenimiento.....	98
Figura 38: EICV Etapa de Fin de Vida. ....	99
Figura 39: Categoría de Impacto de Cambio Climático para los sistemas evaluados.....	101
Figura 40: Impactos en la categoría de cambio climático de los sistemas de generación de energía oceánica debido a los materiales. ....	102
Figura 41: Impactos en la categoría de cambio climático de distintos sistemas de generación de energía.....	104
Figura 42: Categoría de Impacto de Agotamiento de la Capa de Ozono para los sistemas evaluados. .....	106
Figura 43: EICV Categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono de los escenarios de disposición final para cada sistema evaluado.....	108

Figura 44: Categoría de Impacto de Acidificación Terrestre para los sistemas evaluados. ....	109
Figura 45: Categoría de Impacto de Eutrofización Marina para los sistemas evaluados. ....	111
Figura 46: Categoría de Impacto de Toxicidad Humana para los sistemas evaluados.....	112
Figura 47: Categoría de Impacto de Formación de Material Particulado para los sistemas evaluados. .....	114
Figura 48: Categoría de Impacto de Ecotoxicidad Marina para los sistemas evaluados.....	115
Figura 49: Categoría de Impacto de Agotamiento de los Recursos Minerales para los sistemas evaluados.....	116
Figura 50: Categoría de Impacto de Agotamiento de los Combustibles Fósiles para los sistemas evaluados.....	118

## TABLAS

Tabla 1: Fuentes de Energía Renovable.....	16
Tabla 2: Energías del Océano.....	21
Tabla 3: Categorías de Impacto a punto medio de la metodología ReCiPe (Goedkoop, 2009). .....	36
Tabla 4: Factores de caracterización para la categoría de cambio climático.....	37
Tabla 5: Emisiones de GEI aerogeneradores offshore. ....	39
Tabla 6: ACV de aerogeneradores offshore. ....	40
Tabla 7: ACV de sistemas de extracción de energía undimotriz.....	41
Tabla 8: Características de diseño para un aerogenerador offshore. ....	45
Tabla 9: Escenarios de fin de vida para los materiales que componen un aerogenerador offshore. .	46
Tabla 10: Escenarios de disposición final asumidos para el aerogenerador offshore. ....	47
Tabla 11: Características de diseño para dispositivo undimotriz tipo absorbedor puntual “boya con brazo.” .....	50
Tabla 12: Características de diseño para la Planta de Energía Undimotriz en Mutriku, España. ....	55
Tabla 13: Tasa de reciclaje supuesta para cada material utilizado. ....	57
Tabla 14: Categorías de impacto seleccionadas. ....	63
Tabla 15: ICV Aerogenerador Offshore.....	64
Tabla 16: Materiales del aerogenerador offshore.....	69
Tabla 17: ICV Boya con Brazo. ....	71
Tabla 18: Materiales requeridos por una Boya con Brazo. ....	74
Tabla 19: Combustibles requeridos por la Boya con Brazo. ....	75
Tabla 20: ICV Mutriku.....	76
Tabla 21: Materiales requeridos por la Planta de Energía Undimotriz de Mutriku, España. ....	78
Tabla 22: EICV de los sistemas estudiados. ....	80
Tabla 23: EICV Aerogenerador Offshore. ....	84
Tabla 24: EICV Sistemas de Energía Undimotriz tipo Absorbedor Puntual. ....	90
Tabla 25: EICV Sistemas de Energía Undimotriz tipo OWC y Overtopping.....	95

## RESUMEN

La creciente demanda de energía eléctrica alrededor del mundo y su abastecimiento principalmente a través de combustibles fósiles ha desencadenado consecuencias negativas sobre el medio ambiente. Es por ello que la generación de electricidad a través de las fuentes de energía del océano, pueden ser una alternativa más limpia que la de los combustibles fósiles.

Una de las estrategias de México por impulsar el uso de las fuentes de energía renovables detonó con la creación del Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano (CEMIE-Océano), el cuál es una agrupación científica, destinada a la investigación de la extracción de energía a través de esta fuente renovable. CEMIE-Océano ha definido, que los océanos del país tienen el potencial energético para ser una alternativa al uso de combustibles fósiles. Sin embargo, contrario a lo que se cree, las energías del océano, incluso siendo una fuente renovable, también genera impactos ambientales y es de gran importancia identificar el grado de afectación que provoca el despliegue de las diversas tecnologías que permiten la extracción de energía oceánica.

El objetivo de este trabajo es evaluar los potenciales impactos ambientales de tres dispositivos de generación de energía eléctrica que emplean fuentes de energía oceánica para la identificación de nichos de trabajo que permitan la reducción de los impactos sobre el medio ambiente. Asimismo, se pretende generar información que facilite el proceso de toma de decisiones.

Los dispositivos de generación de energía a través del océano analizados son: un aerogenerador offshore, un dispositivo undimotriz tipo absorbedor puntual y como una planta de energía undimotriz del tipo columna de agua oscilante. Los impactos ambientales se evaluaron utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), de acuerdo con las Normas ISO 14040/44 (ISO, 2006), con un enfoque “de la cuna a la tumba”. El método seleccionado para la evaluación de impactos de ciclo de vida fue ReCiPe v1.08 a punto medio y la modelación de los sistemas se realizó con el software GaBi Thinkstep. Se utilizaron las bases de datos de Ecoinvent v3.4 y GaBi Database. La función de dichos dispositivos es generar electricidad utilizando fuentes de energía oceánica. La unidad funcional se definió como: 1 kWh de energía eléctrica generada mediante cada uno de los dispositivos evaluados, considerando un periodo de vida útil de 20 años.

Los resultados muestran que los tres dispositivos de energía del océano analizados generan entre un 71 hasta un 98% menos emisiones de gases efecto invernadero que la planta de energía a base de carbón reportada por Li et al (2020). Para los tres dispositivos estudiados, la etapa de construcción es aquella con mayores impactos asociados en la mayoría de las categorías de impacto analizadas, esto se debe principalmente a los altos consumos de acero, el cual es necesario para la fabricación de los diferentes componentes de cada uno de los dispositivos. Los impactos asociados al uso del acero oscilan entre el 3 al 215%, en las diferentes categorías de impacto analizadas. La etapa de generación tiene bajos impactos asociados, que se deben al uso lubricantes necesarios para el correcto funcionamiento de los dispositivos. En la etapa de fin de vida, se demostró que la correcta gestión de los residuos permite minimizar los impactos ambientales asociados a cada sistema.

A partir de los resultados, se puede concluir que los sistemas de generación de electricidad a través del océano analizados pueden contribuir a que México transite hacia un suministro de la energía baja en carbono. Donde para lograrlo todavía es necesario continuar investigando sobre los impactos ambientales que la metodología de ACV no contempla, así como en el desarrollo de materiales que permitan minimizar el consumo de acero utilizado a lo largo del ciclo de vida de las tecnologías presentadas en este trabajo, de manera que se incremente su desempeño ambiental.

**Palabras claves:** Energías del Océano, Análisis de Ciclo de Vida.

# ABSTRACT

The growing demand for electricity around the world and its supply mainly through fossil fuels has had negative consequences on the environment. That is why the generation of electricity through ocean energy sources can be a cleaner alternative to fossil fuels.

One of Mexico's strategies to promote the use of renewable energy sources detonated with the creation of the Mexican Center for Ocean Energy Innovation (*CEMIE-Océano*), which is a scientific group, dedicated to researching the extraction of energy through this renewable source. *CEMIE-Océano* has determined that the country's oceans have the energy potential to be an alternative to the use of fossil fuels. However, contrary to what is believed, ocean energy, even being a renewable source, also generates environmental impacts and it is of great importance to identify the degree of impact caused by the deployment of various technologies that allow the extraction of ocean energy.

The objective of this work is to evaluate the potential environmental impacts of three electric power generation devices that use ocean energy sources for the identification of work niches that allow the reduction of impacts on the environment. It is also intended to generate information to facilitate the decision-making process.

The ocean energy generation devices analyzed are: an offshore wind turbine, a point absorber type wave-driven device and a wave power plant of the oscillating water column typ. The environmental impacts were assessed using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, according to ISO 14040/44 (ISO, 2006), with a "cradle to grave" approach. The method selected for the life cycle impact assessment was ReCiPe v1.08 at midpoint and the modeling of the systems was performed with GaBi Thinkstep software. Ecoinvent v3.4 and GaBi Database were used. The function of these devices is to generate electricity using ocean energy sources. The functional unit was defined as: 1 kWh of electrical energy generated by each of the devices evaluated, considering a useful life of 20 years.

The results show that the three ocean energy devices analyzed generate 71 to 98% less greenhouse gas emissions than the coal-fired power plant reported by Li et al (2020). For the three devices studied, the construction stage is the one with the highest associated impacts in most of the impact categories analyzed, this is mainly due to the high consumption of steel, which is necessary for the manufacture of the different components of each of the devices. The impacts associated with the use of steel range from 3 to 215% in the different impact categories analyzed. The generation stage has low associated impacts, which are due to the use of lubricants necessary for the correct functioning of the devices. In the end-of-life stage, it was shown that the correct management of waste allows minimizing the environmental impacts associated with each system.

Based on the results, it can be concluded that the ocean-based electricity generation systems analyzed can contribute to Mexico's transition to a low-carbon energy supply. To achieve this, it is still necessary to continue researching on the environmental impacts that the LCA methodology does not consider, as well as in the development of materials to minimize the consumption of steel used throughout the life cycle of the technologies presented in this work, in order to increase their environmental performance.

**Key words:** Ocean Energies, Life Cycle Assessment.

# 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, existe una creciente demanda de energía eléctrica alrededor del mundo la cual se ve abastecida principalmente por combustibles fósiles. Sin embargo, el uso de este tipo de fuentes de energía representa un reto no solo para el suministro, puesto que al tratarse de recursos no renovables sus reservas son limitadas lo que se traduce como una disminución creciente e irremplazable de los mismos. Adicionalmente, también conlleva un desafío más complejo debido a que su uso contribuye al deterioro ambiental, siendo el cambio climático uno de los retos ambientales más importantes y al cual el uso de combustibles fósiles aporta grandes cantidades de emisiones de gases efecto invernadero contabilizadas como dióxido de carbono equivalente.

Las consecuencias del uso de este tipo de combustibles como fuente de suministro de la demanda eléctrica mundial, se reflejan como deterioro ambiental y agotamiento de los recursos no renovables. Sin embargo, muchas de las actividades antropogénicas dependen de la energía eléctrica, por lo cual no es factible reducir su producción. Debido a lo anterior, una de las preocupaciones a nivel internacional es brindar energía eléctrica, pero sin que ello represente un riesgo para el medio ambiente ni para la sociedad. Concretamente, esta preocupación se plasma en dos de los diecisiete Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) impulsados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), el séptimo que es proveer de “Energía Asequible y No Contaminante” a la población mundial y el objetivo número trece “Acción por el Clima” (ONU, 2015). A través de ellos, la ONU invita a los países a transitar hacia fuentes de energía que ayuden a minimizar el impacto ambiental asociado a la generación de gases efecto invernadero derivados del uso de combustibles fósiles durante la producción de electricidad.

En respuesta a estos dos grandes retos planteados por la ONU, surgen iniciativas innovadoras como la generación de electricidad a partir de fuentes de energía oceánica. En términos generales, estas fuentes de energía que contiene el océano se estima que podrían eventualmente proveer alrededor del 10% de la demanda eléctrica mundial (Pelissero *et al.*, 2011; Pinto, 2017). Para ello se creó el Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano (CEMIE-Océano) con el propósito de promover el desarrollo tecnológico en el sector energético de México, buscando vincular al sector público y privado con la investigación científica, donde uno de los ejes transversales es la generación de energía minimizando los impactos al medio ambiente.

Si bien la extracción de energía del océano es una opción para impulsar una economía baja en carbono, y en México CEMIE-Océano ha definido, a través de diferentes investigaciones, que el potencial energético de los océanos puede ser una alternativa al uso de combustibles fósiles contribuyendo al compromiso del país con los ODS (Félix *et al.*, 2019; Hernández *et al.*, 2019). Por ende, es necesario evaluar los cambios en el medio ambiente que provoca el despliegue de los dispositivos en los sitios elegidos para ello, además de las repercusiones tanto positivas y/o negativas que esto tendrá económica y socialmente, en un ambiente tan poco estudiado con lo es el marino.

Como parte de la preocupación del CEMIE-Océano por identificar el grado de afectación ambiental que provocan estos desarrollos tecnológicos de una forma objetiva, holística y sistemática que permita la toma de decisiones responsables, esta investigación esta enmarcada bajo la metodología estandarizada a nivel internacional de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Esta metodología, proporciona un mejor conocimiento en relación a los posibles impactos ambientales generados, por este tipo de tecnologías.

## 1.1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Hoy en día, el rápido crecimiento de la economía mundial ha contribuido al incremento de la demanda energética, la cual se abastece principalmente por medio de combustibles fósiles (carbón, petróleo y

gas natural). Las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), son la principal causa del cambio climático, afectando negativamente la seguridad y desarrollo de los seres humanos y los ecosistemas en general (Legung y Yang, 2012; Sun et al., 2012; Montero y Calvo, 2013; Pinto, 2017; Paredes et al., 2019; Sánchez, 2020).

La tendencia actual, es buscar fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles, que permitan desarrollar una economía baja en carbono. Sin embargo, el desarrollo de dispositivos de aprovechamiento energético a través de fuentes renovables se ha visto limitado (Douglas et al., 2008; Esteban et al., 2011; Sánchez, 2020). En un esfuerzo por impulsar las energías renovables en el 2015 la ONU aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, la cual establece 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, entre los cuales el séptimo y décimo tercero de estos están relacionados con la generación de sistemas de energía asequibles y no contaminantes que permitan tomar acción sobre el cambio climático (ONU, 2015).

Una de las estrategias de México para impulsar el desarrollo sostenible a través de recursos renovables y con la finalidad de alcanzar el objetivo establecido en la Ley General de Cambio Climático y la Ley de Transición Energética de contar con un 35% de fuentes renovables dentro del mix energético nacional, fue la creación de los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIEs). Los CEMIEs son agrupaciones científicas, destinadas a la investigación de diferentes fuentes de energía renovable: biomasa, eólica, geotérmica; oceánica y solar. Estos centros de investigación reúnen a la academia y la industria con el objetivo de desarrollar tecnologías, productos y servicios, que permitan al país aprovechar estos recursos (Secretaría de Energía [SENER], 2015).

Este trabajo aborda el aprovechamiento de la energía renovable marina con el objeto de contribuir en el tránsito hacia una economía baja en carbono, considerando que las tecnologías para su extracción no generan emisiones directas durante la operación de los mismos o que sus impactos son menores en comparación con los combustibles fósiles, ya que se trata de estructuras artificiales que llegan a utilizar insumos y a generar emisiones que a lo largo de su ciclo de vida interactúan con el medio natural, sus posibles efectos no deben ser ignorados.

Gracias a la experiencia de países europeos, donde el aprovechamiento de la energía oceánica comenzó desde el año 2001 (Sun et al., 2012), se sabe que los dispositivos de energía del océano ofrecen el potencial de limitar los impactos ambientales, especialmente en lo que respecta a las emisiones de gases efecto invernadero (Uihlen, 2016). Sin embargo, los impactos ambientales asociados a estas tecnologías requiere mayor investigación, puesto que hoy en día se encuentran limitados, en su mayoría, a la huella de carbono que producen sin contabilizar otro tipo de impactos asociados a su cadena de valor y a su interacción con el medio marino, tanto a corto como largo plazo (Legung y Yang, 2012; Sun et al., 2012; Bonou et al., 2016; Kaldellis y Apostolou, 2017; Oh et al., 2018; Pennoch et al., 2021).

Es por ello que el presente trabajo busca brindar conocimiento sobre los impactos ambientales generados por distintos dispositivos generadores de energía desarrollados por CEMIE-Océano para el contexto del recurso energético disponible en los océanos mexicanos, por medio de la metodología de ACV, con el fin de evaluar dichos sistemas desde un enfoque holístico que vaya más allá del tradicional y reportando otros impactos que determinan su desempeño ambiental, más allá de la huella de carbono y considerando todas las etapas de sus cadenas de valor.

Las tecnologías de generación de energía a través del océano que se presentan en este trabajo son: un aerogenerador eólico marino offshore y dos sistemas de extracción de energía de las olas, el primero uno del tipo boya con brazo y el segundo del tipo columna de agua oscilante. Dichos dispositivos se eligieron puesto que son de interés para el CEMIE-Océano. En el caso del aerogenerador offshore

surge por la decisión de empezar a caracterizar el potencial eólico marino, así como sus posibles impactos ambientales, principalmente en la Península de Yucatán, específicamente en la Isla Cervera (García, 2020; Silva, 2020).

Por otra parte, los estudios teóricos realizados sugieren que México cuenta con un potencial de energía undimotriz que puede ser aprovechado sobre todo si se comienza a utilizar la infraestructura disponible cerca de la costa (Hernández et al., 2019), como lo son los muelles; sitios elegidos para la instalación de los dispositivos undimotrices propuestos.

El dispositivo tipo boya con brazo es un proyecto de la empresa mexicana DINA, donde CEMIE-Océano ha colaborado. Se tiene planeado instalar en el Muelle 1 del Puerto de El Sauzal, Baja California (Comisión Federal de Electricidad [CFE], 2014; García, 2019), con el objetivo de generar energía eléctrica mediante las olas del mar en esta zona. Mientras que el sistema de tipo columna de agua oscilante, se planteo de acuerdo a la información recabada de la literatura y directamente con investigadores de la Central de Energía Undimotriz localizada el Puerto de Mutriku, España.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar los impactos ambientales de la electricidad generada a través de la energía contenida en el océano, considerando los siguientes sistemas: eólico marino, undimotriz tipo absorbedor puntual y undimotriz tipo columna de agua oscilante; mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, para identificar potenciales mejoras ambientales.

### 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer la unidad funcional y las etapas de ciclo de vida de cada uno de los sistemas, considerando su función, características de generación y dimensionamiento (potencia nominal, tamaño y cantidad de dispositivos).
- Calcular los flujos de materia y energía que intervienen en cada etapa del ciclo de vida de los sistemas a evaluar.
- Modelar los efectos ambientales de cada uno de los flujos de materia y energía calculados.
- Identificar mejoras ambientales en cada una de las etapas del ciclo de vida de los sistemas evaluados.

## 2. MARCO TEÓRICO

En la actualidad, los combustibles fósiles, es decir, el petróleo, el gas natural y el carbón, son los principales recursos energéticos y su consumo está aumentando debido, en gran parte, a las mejoras en la calidad de vida, la industrialización en los países de desarrollo y el aumento de la población mundial (Posso, 2002; Esteban et al., 2011; Panwar et al., 2011; Ozkan et al., 2020). El uso de estos combustibles ha aumentado las preocupaciones en el mundo moderno, puesto que desde hace tiempo se ha reconocido que su consumo excesivo no solo conduce a la disminución de las reservas de los mismos a un ritmo más rápido de lo que pueden producirse, sino también a un importante efecto adverso en el medio ambiente, dando lugar a problemas globales como el cambio climático, debido al incremento de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) y los riesgos a la salud humana y al bienestar social debido a sus efectos (Panwar et al., 2011; Cortés, 2019; Ozkan et al., 2020).

Una de las principales fuentes en la generación de emisiones de GEI es el sector energético, ya que estos se emiten a la atmósfera terrestre durante el proceso de combustión (Panwar et al., 2011; Kaddoura et al., 2019). Lo anterior, ha llevado a distintos países a plantear medidas que buscan

vigilar, controlar y mitigar los impactos generados apostando por el desarrollo de dispositivos de aprovechamiento energético a través de fuentes de energía que permitan reemplazar el uso de combustibles fósiles e impulsar la reducción de los GEI (Posso, 2002; Esteban et al., 2011; Cortés, 2019; Ozkan et al., 2020; Sánchez, 2020).

## 2.1. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1.1. ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables son aquellas que se consideran inagotables y que pueden ser utilizadas para producir energía una y otra vez, satisfaciendo las necesidades energéticas y favoreciendo el equilibrio entre el medio ambiente y los recursos existentes, los cuales se han consumido irracionalmente durante largo tiempo, promoviendo así sistemas energéticos sostenibles con bajas o nulas emisiones de contaminantes atmosféricos como lo son los gases de efecto invernadero (Panwar et al., 2011; Tello y Marulanda, 2017; Sánchez, 2020).

Las fuentes de energía renovable, en principio provienen del sol, que es el motor generador de todas las transformaciones que dan lugar a diversos flujos de energía originando las demás fuentes, las cuales se dividen principalmente en 6 grupos: solar, hidráulica, biomasa, eólica, geotérmica y oceánica (Panwar et al., 2011; Ellabban et al., 2014; Tello y Marulanda, 2017; Cortés, 2019) a continuación, en la Tabla 1 se explican brevemente cada una de ellas.

**Tabla 1:** Fuentes de Energía Renovable.

Fuente de energía	Formas de aprovechamiento	Referencia
Eólica	Es aquella que se obtiene del viento, proveniente de la energía cinética generada por el movimiento de las masas de aire que se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas.	(Sánchez, 2020) (Ellabban et al., 2014) (Panwar et al., 2011) (Amundarain, 2012) (Romera, 2010)
Geotérmica	Perforación de acuíferos	
	Impulsión de agua fría	
	Vapor entre rocas caliente	
Oceánica	Es aquella que proviene del mar y se debe a la influencia de la radiación solar y de los campos gravitatorios solar, terrestre y lunar sobre los océanos. Debido a la extensa ocupación del océano sobre la superficie terrestre, existe una gran cantidad de energía aprovechable en diferentes formas.	
Hidráulica	La energía hidráulica es la fuente renovable más utilizada en el mundo, la cual aprovecha la energía cinética y potencial del agua para la generación de energía eléctrica. Entre los beneficios de esta forma de producir energía se encuentra que no genera residuos, es sencilla de controlar y tiene una eficiencia muy alta, siendo esta aproximadamente del 80% en la mayoría de los casos. Sin embargo, el uso excesivo de la misma tiene como consecuencia crear un desequilibrio ambiental en la zona donde se utilice.	

**Tabla 1:** Fuentes de Energía Renovable (Continuación).

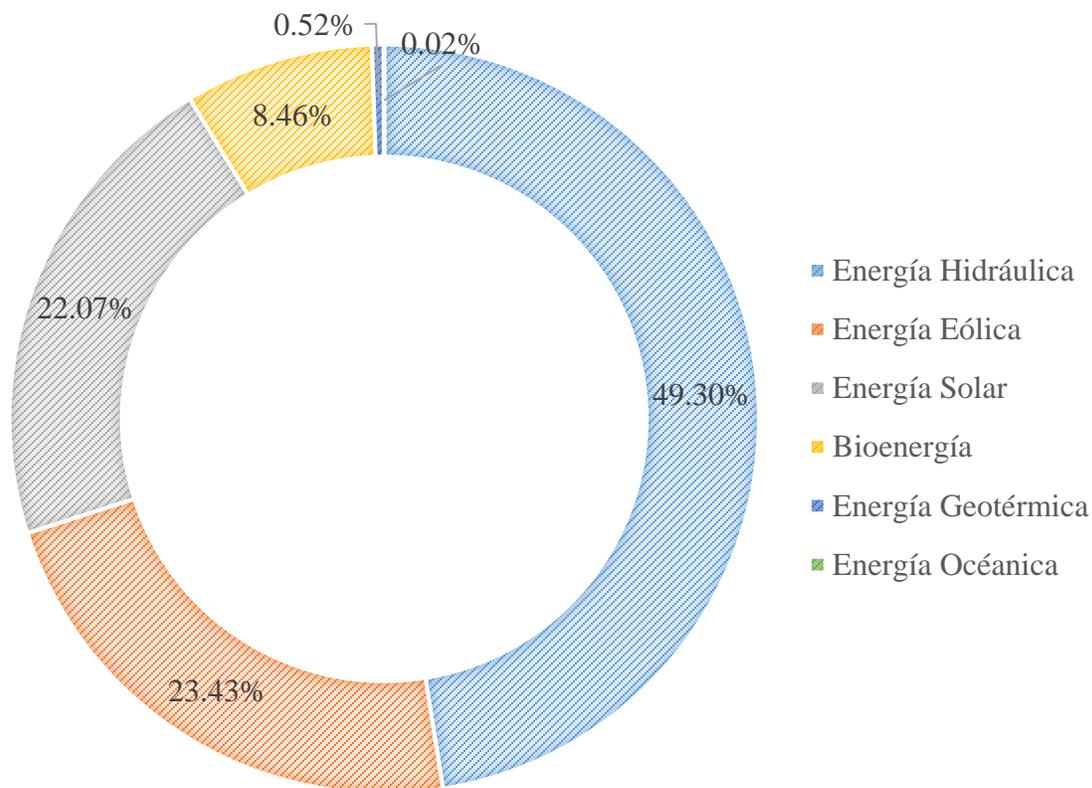
Fuente de energía	Formas de aprovechamiento		Referencia
<p>Biomasa</p> <p>Es el conjunto de materia orgánica de origen vegetal y animal procedente de la transformación natural o artificial de esta. La energía producida por esta fuente, es llamada comúnmente bioenergía y es la conversión de la biomasa en formas útiles de energía como calor, electricidad y combustibles líquidos.</p> <p>El uso de biomasa para la generación de energía se ha convertido en una opción atractiva para el aumento de la producción de energía disminuyendo el impacto sobre el medio ambiente y aprovechando residuos.</p>	<p>Biogás</p>	<p>Para la producción de biogás se pueden utilizar diferentes sustratos: fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, residuos de la industria alimentaria, lodos generados en el tratamiento de aguas residuales, residuos agrícolas como los generados por cultivos y ganadería. Este se obtiene generalmente a través de digestión anaerobia y se puede utilizar directamente para uso doméstico, como combustible de transporte u otras aplicaciones.</p>	<p>(Sánchez, 2020) (Ellabban et al., 2014) (Panwar et al., 2011) (Amundarain, 2012) (Romera, 2010)</p>
	<p>Biodiesel</p>	<p>Es un combustible de combustión limpia, renovable y biodegradable. Se extrae del aceite de diferentes cultivos. Tiene el potencial de reducir las emisiones de gases efecto invernadero y las emisiones de partículas debido a la quema de combustibles durante su uso en diferentes medios de transporte</p>	
	<p>Gasificación</p>	<p>Es la conversión de un combustible sólido, generalmente la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, en combustible gaseoso a través de una ruta de conversión termoquímica.</p>	

**Tabla 1:** Fuentes de Energía Renovable (Continuación).

Fuente de energía		Formas de aprovechamiento		Referencia
Solar	Es la fuente de energía renovable más abundante y se encuentra disponible tanto directa como indirectamente.	Térmica	Es la transformación de la energía solar para producir calor que pueda aprovecharse de diferentes formas como la cocción de alimentos o la obtención de agua caliente.	(Sánchez, 2020) (Ellabban et al., 2014) (Panwar et al., 2011) (Amundarain, 2012) (Romera, 2010)
		Termoeléctrica	Es una forma de utilizar la energía solar para producir electricidad. Este tipo de tecnologías utiliza la radiación solar para la generación de electricidad a través de la conversión de calor.	
		Fotovoltaica	Se trata de sistemas de conversión directa de energía solar a energía eléctrica.	

Las energías renovables tienen un alto potencial teórico de generación, sin embargo, el potencial técnico es mucho menor, debido a que la implementación de dispositivos que aprovechen cualquiera de las diferentes fuentes de energía alternativas depende de varios factores como lo son: el desarrollo de tecnologías adecuadas, cambios tecnológicos que permitan el ahorro de energía, la eficiencia en la producción, costos asequibles (Lund, 2007; Montero y Calvo, 2013; Tello y Marulanda, 2017; Wilberforce et al., 2019).

A pesar de estos retos, en el 2008 las energías renovables representaban el 12.9% del total de energía primaria suministrada a nivel mundial (Wilberforce et al., 2019), porcentaje que ha ido aumentando a través de los años. La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA por sus siglas en inglés *International Renewable Energy Agency*) en su informe del 2020, estima que en el 2019 la capacidad máxima de generación neta en MW, que no necesariamente es la capacidad real generada, fue de 2,657,694 MW a nivel mundial (IRENA, 2020). La Figura 1, muestra la distribución de la capacidad mundial máxima de generación de las diferentes energías renovables mencionadas en la Tabla 1.



**Figura 1:** Distribución mundial de la capacidad mundial máxima de generación de las energías renovables (IRENA, 2020)

Como se puede observar (Figura 1), la energía hidráulica es la que tiene mayor capacidad a nivel mundial. Lo anterior se debe a que esta fuente de energía renovable es quizá la forma más antigua de aprovechamiento de energía para el desarrollo de actividades productivas de la humanidad. Se ha utilizado desde tiempo remotos, cuando los molinos se colocaban cerca de los ríos para aprovechar la energía potencial del mismo (Posso, 2002).

Seguido de la energía hidráulica, esta la eólica (23.43%) y la solar (22.07%) en sus diferentes formas (IRENA, 2020). Por otra parte, en la Figura 1 se puede observar que la energía oceánica es la que menor participación tiene con tan solo el 0.02%, ya que a pesar de que se trata de una energía altamente aprovechable, la cual se estima que podría eventualmente proveer alrededor del 10% de la demanda eléctrica mundial, es todavía una alternativa en desarrollo (Pelissero et al., 2011; Pinto, 2017; Hernández et al., 2020).

El desarrollo de estas tecnologías se ha dado, no solo por el conocimiento científico y técnico para su implementación en los sitios de aprovechamiento, sino también por el desarrollo de políticas que traten de explorar y fomentar su uso. Sin embargo, sigue siendo un reto el que los gobiernos implementen mecanismos que faciliten la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías de

aprovechamiento de energías renovables y que desplieguen políticas para eliminar las desventajas económicas frente a las tecnologías convencionales uso (Wilberforce et al., 2019).

Hoy en día, se requiere, con urgencia, resolver tanto los retos técnicos, como los socio-políticos, puesto que aumentar el uso de tecnologías de generación de energía a través de fuentes de energías renovables se sabe, por diversos estudios, que tienen una disminución en los impactos ambientales (Bhat y Prakash, 2009; Panwar et al., 2011).

Es importante resaltar que, a pesar del beneficio del aprovechamiento de estas fuentes de energía, para que dichos sistemas cumplan el objetivo de reducir el estrés sobre el medio ambiente se debe hacer una correcta selección de la tecnología de extracción a utilizar y tener bien identificados los impactos generados por el combustible fósil que será reemplazado (Panwar et al., 2011).

Para la correcta selección de la tecnología de extracción de energía renovable se deben tener en cuenta algunos factores como lo son: el potencial teórico de energía producida en el sitio de instalación, la carga sobre el medio ambiente que implica su construcción, operación y desmantelamiento, las facilidades técnicas para su distribución a la red, la aceptación social, los costos, entre otros (Bhat y Prakash, 2009; Hernández et al., 2020).

Además, el uso de estos sistemas se prevé tenga importantes consecuencias sociales positivas, al contribuir hacia un cambio del modelo del productivo lineal y poniendo fin a la dependencia en los combustibles fósiles, lo que se espera traerá mejoras en materia de salud (García et al., 2016).

## 2.1.2. ENERGÍAS DEL OCÉANO

En el sentido de buscar nuevas fuentes de energía con las que se pueda reemplazar el uso de combustibles fósiles, el aprovechamiento de la energía almacenada en los mares resulta ser una opción interesante, ya que estos ocupan más de un 70% de la superficie terrestre y es donde mayor energía es almacenada y liberada (Amundarain, 2012; Montero y Calvo, 2013). En la Tabla 2, se resumen las diferentes formas de energía disponible en los océanos y los dispositivos existentes para su aprovechamiento, así como la escala de desarrollo en la que se encuentran cada uno de ellos.

**Tabla 2: Energías del Océano**

Energía	Tipo de Dispositivos	Dispositivo	Desarrollador o Ubicación	Escala	Referencias	
<p><b>Corrientes Marinas</b></p> <p>Es la energía que se genera por los movimientos cíclicos de elevación y caída de las olas, por medio de las cuales es posible generar potencia eléctrica (Posso, 2002).</p> <p>Las principales causas que generan este desplazamiento son los vientos constantes y las diferencias de densidad en el agua, mientras que la morfología de las costas y el movimiento de rotación terrestre (que actúa de manera distinta en el fondo del océano y en su superficie) influyen en su dirección (García, 2014).</p> <p>El principio de los dispositivos convertidores de corrientes marinas es el aprovechamiento de la energía de un fluido en movimiento, en este caso agua, en el movimiento de un sistema mecánico que pueda accionar un generador (García <i>et al.</i>, 2016).</p>	Turbinas de corriente	<p><i>Flujo axial:</i> su eje es horizontal y en la misma dirección del flujo, tienen forma similar a los generadores eólicos y a las hélices que impulsan los buques (García, 2014).</p>	SeaGen	Marine Current Turbine	Comercial	<p>(Cascajo et al., 2019) (Paredes et al., 2019) (Zamorano, 2019) (Garduño et al., 2017) (Díaz, 2015) (Ellabban et al., 2014) (García, 2014) (Castiella, 2013) (Amundarain, 2012) (Grünewald, 2012) (Caballero, 2011) (López et al., 2010)</p>
			Turbina Open Centre	OpenHydro	Piloto	
			AR1000	Atlantis Resources Corporation	Piloto	
			HS1000	Andritz Hydro Hammerfest	Piloto	
			VOITH HY TIDE 1000-16	Voith Hydro Ocean Current Technologies	Piloto	
			Deep Gen IV	Tidal Generation Ltd	Piloto	
			DeltaStream		Piloto	
			SR250	Scotrenewable Tidal Power Ltd	Laboratorio	
			Kawasaki 1MW Tidal Turbine	Kawasaki Heavy Industries	Laboratorio	
		Beluga 9	Alstom Hydro	Laboratorio		
		Hidrogenerador IMPULSA	IINGEN- UNAM	Laboratorio		
		Pulse-Stream 100	Pulse Tidal Ltd	Laboratorio		
		Deep Green	Minesto	Laboratorio		
		<p><i>Perfil hidrodinámico Oscilante:</i> consiste en un brazo que permite la oscilación vertical, su movimiento es debido al flujo horizontal que provoca la sustentación del perfil (Grünewald, 2012).</p>				
		<p><i>Tidal Kite (Cometa de Corriente):</i> se encuentra en suspensión. Los dispositivos van describiendo una trayectoria en forma de ocho, aprovechando las aceleraciones de la cometa cuando baja en picada para una mayor rotación de la turbina (Grünewald, 2012).</p>				

**Tabla 2:** Energías del Océano (Continuación)

Energía	Tipo de Dispositivo	Dispositivo	Desarrollador - Ubicación	Escala	Referencias
<p><b>Maremotriz</b></p> <p>Se basa en el aprovechamiento de la energía liberada por el agua del mar en sus movimientos de ascenso y descenso de las mareas (Amundarain, 2012).</p> <p>Fundamentalmente, una central maremotriz almacena agua en un embalse durante la plenamar o marea alta, para que más tarde, al abrir las compuertas de ese embalse, durante la bajamar o marea baja, se pueda utilizar la fuerza del agua para mover las palas de una turbina y de esta forma generar electricidad (Montero y Calvo, 2013).</p>	<p><i>Presas de Marea:</i> Hacen uso de la energía potencial que existe en la diferencia de altura (o pérdida de carga) entre las mareas altas y bajas. Las presas son esencialmente los diques en todo el ancho del estuario.</p>	La Rance	Francia	Comercial	<p>(Cascajo et al., 2019) (Paredes et al., 2019) (Zamorano, 2019) (Garduño et al., 2017) (Díaz, 2015) (Ellabban et al., 2014) (García, 2014) (Castiella, 2013) (Amundarain, 2012) (Grünewald, 2012) (Caballero, 2011) (López et al., 2010)</p>
		Anápolis Royal	Canadá		
		Jiangxia	China		
		Kislaya Bay	Rusia		
		Severn	Reino Unido		
<p><b>Gradiente Térmico</b></p> <p>Es la que se obtiene de la diferencia de temperatura entre la superficie del mar (foco caliente), y las aguas de las profundidades marinas (foco frío). Para su aprovechamiento es necesario, al menos una diferencia de temperatura de 20 °C (Amundarain, 2012; Montero y Calvo, 2013).</p>	<p><i>Ciclo cerrado:</i> Es conocido como ciclo Anderson, y utiliza fluidos de trabajo con bajo punto de ebullición, como el amoniaco, el propano, freón, R134, R123, R152a, entre otros, para el impulso de las turbinas. Para este ciclo, el agua “caliente” de la superficie es bombeada hacia un intercambiador de calor, donde evaporará al fluido de trabajo, para que este se dirija hacia una turbina que moverá para la producción de electricidad (Zamorano, 2019).</p>	<p>OTEC (<i>Ocean Thermal Energy Conversion</i> por sus siglas en inglés) de Ciclo Cerrado (CC).</p>	Japón	Comercial*	
			Corea del Sur	Piloto	
			DCNS	Piloto	
			Maki Ocean Engineering	Comercial*	
	<p><i>Ciclo abierto:</i> Se conoce también como ciclo de Claude y utiliza agua como fluido de trabajo (Zamorano, 2019).</p> <p><i>Ciclo mixto:</i> Tiene como objetivo la generación de energía eléctrica y la desalinización de agua de mar. Al igual que en el ciclo abierto, el ciclo mixto utiliza un evaporador flash, para transformar el agua de la superficie del mar en vapor. Por transferencia de calor, este vapor de agua se utiliza para llevar a estado gaseoso al fluido de trabajo para operar la turbina, después, el vapor de agua de fluido de trabajo, se condensan de forma separada, obteniendo agua fresca y electricidad (Zamorano, 2019).</p>				

\* Se encuentran conectadas a la red y proveen energía a la población, sin embargo, el orden de magnitud de la energía es de kW.

**Tabla 2: Energías del Océano (Continuación)**

Energía	Tipo de Dispositivo	Dispositivo	Desarrollador - Ubicación	Escala	Referencia																																	
<p><b>Gradiente Salino</b></p> <p>Consiste en aprovechar la diferencia de salinidad entre el agua de océanos y ríos, en zonas donde se puede tener energía debido a la diferencia de presión osmótica (Amundarain, 2012).</p> <p>Se basa en el fenómeno de ósmosis, que se define como el transporte de agua a través de una membrana semi-permeable, el agua dulce (ríos) y el agua salada (mar) son quizadas en cámaras separadas, divididas por una membrana artificial, las moléculas de sal en el agua de mar desplazan el agua dulce a través de la membrana, lo que aumenta la presión sobre el lado del agua del mar que posteriormente acciona una turbina generadora de energía eléctrica (García, 2014).</p>	<p><i>Osmosis de Presión Retardada (PRO)</i>: Al colocar dos cuerpos de agua de diferente concentración salina, separados por una membrana, cuando estos cuerpos se mezclan, esta mezcla tendera al equilibrio de la concentración por el fenómeno de osmosis, en el cual el agua se desplazará de un punto de menor concentración a un punto de mayor concentración. El cambio en la concentración produce un flujo de energía en forma de presión, entre mayor la diferencia de la salinidad de los dos cuerpos, es mayor la presión obtenida (Zamorano, 2019).</p> <p><i>Electrodiálisis Inversa (RED)</i>: Sus componentes principales constan de una repetición de compartimientos de alimentadores de agua de mar, membranas catiónicas selectivas, compartimientos de alimentación de agua de río y membranas aniónicas selectivas. En las celdas sucede una reacción espontánea donde se produce una corriente de iones que será convertida a una corriente eléctrica por una reacción redox, utilizando una sustancia como el cloruro de hierro como electrolito (Zamorano, 2019).</p>																																					
<p><b>Undimotriz</b></p> <p>Es la energía que se puede aprovechar del movimiento de las olas. Se genera principalmente por la atracción gravitacional del sol y la luna sobre los océanos, y es susceptible a convertirse en movimiento mecánico o presión hidráulica útiles para la conversión directa en energía eléctrica a través de un generador (Posso, 2002; Montero y Calvo, 2013).</p>	<p><i>Columna oscilante de agua</i>: consiste en una columna vertical hueca, la parte inferior de la misma está sumergida en el mar y la parte superior en contacto con la atmósfera, en la parte superior de la columna va instalada una turbina conectada a un generador eléctrico (Castiella, 2013).</p>	<table border="1"> <tr> <td>Land Installed Marine Powered Energy Transformer</td> <td>WaveGen Ltd</td> <td>Comercial</td> </tr> <tr> <td>Mutriku*</td> <td>España</td> <td>Comercial</td> </tr> <tr> <td>GreenWave</td> <td>Oceanlinx</td> <td>Comercial</td> </tr> <tr> <td>The Mighty Whale</td> <td>Japón</td> <td>Comercial</td> </tr> <tr> <td>Pico OWC</td> <td>Portugal</td> <td>Piloto</td> </tr> <tr> <td>LIMPET</td> <td>Reino Unido</td> <td>Piloto</td> </tr> <tr> <td>REWEC3</td> <td>Italia</td> <td>Piloto</td> </tr> <tr> <td>Planta Yongsoo</td> <td>Corea</td> <td>Piloto</td> </tr> <tr> <td>OBREC</td> <td>Italia</td> <td>Piloto</td> </tr> <tr> <td>TAPCHAN</td> <td>Norwave</td> <td>Piloto</td> </tr> <tr> <td>Seawave Slot-Cone Generator</td> <td>WAVEenergy As</td> <td>Piloto</td> </tr> </table>	Land Installed Marine Powered Energy Transformer	WaveGen Ltd	Comercial	Mutriku*	España	Comercial	GreenWave	Oceanlinx	Comercial	The Mighty Whale	Japón	Comercial	Pico OWC	Portugal	Piloto	LIMPET	Reino Unido	Piloto	REWEC3	Italia	Piloto	Planta Yongsoo	Corea	Piloto	OBREC	Italia	Piloto	TAPCHAN	Norwave	Piloto	Seawave Slot-Cone Generator	WAVEenergy As	Piloto			<p>(Cascajo et al., 2019)  (Paredes et al., 2019)  (Zamorano, 2019)  (Garduño et al., 2017)  (Díaz, 2015)  (Ellabban et al., 2014)  (García, 2014)  (Castiella, 2013)  (Amundarain, 2012)  (Grünewald, 2012)  (Caballero, 2011)  (López et al., 2010)</p>
Land Installed Marine Powered Energy Transformer	WaveGen Ltd	Comercial																																				
Mutriku*	España	Comercial																																				
GreenWave	Oceanlinx	Comercial																																				
The Mighty Whale	Japón	Comercial																																				
Pico OWC	Portugal	Piloto																																				
LIMPET	Reino Unido	Piloto																																				
REWEC3	Italia	Piloto																																				
Planta Yongsoo	Corea	Piloto																																				
OBREC	Italia	Piloto																																				
TAPCHAN	Norwave	Piloto																																				
Seawave Slot-Cone Generator	WAVEenergy As	Piloto																																				

\* Se encuentran conectadas a la red y proveen energía a la población, sin embargo, el orden de magnitud de la energía es de kW.

**Tabla 2:** Energías del Océano (Continuación)

Energía	Tipo de Dispositivo	Dispositivo	Desarrollador - Ubicación	Escala	Referencia	
<p><b>Undimotriz</b></p> <p>Esta energía tiene la particularidad de poder aprovechar tanto la energía cinética como la energía potencial para transformarla en energía eléctrica a partir de la energía mecánica generada por el movimiento de las olas (García, 2014).</p>	<p><i>Absorbedores puntuales:</i> son estructuras de tamaño reducido en comparación con el oleaje incidente. Concentran la captación de energía en un punto y generalmente se colocan varios dispositivos agrupados siguiendo una línea (Castiella, 2013).</p>	Archimedeswave swing	AWS Ocean Energy Ltd	Comercial	<p>(Cascajo et al., 2019) (Paredes et al., 2019) (Zamorano, 2019) (Garduño et al., 2017) (Díaz, 2015) (Ellabban et al., 2014) (García, 2014) (Castiella, 2013) (Amundarain, 2012) (Grünewald, 2012) (Caballero, 2011) (López et al., 2010)</p>	
		Powerbuoy	Ocean Power Technologies	Piloto		
		Aquabuoy	Aqua Energy Group Ltd	Piloto		
		WaveStar	Wavestar	Piloto		
		Fred Olsen (FO3)	Noruega	Piloto		
			Reino Unido	Comercial		
		Coppe Subsea Technology	Laboratorio de Tecnología Submarina Coppe	Piloto		
	BRISTOL	Universidad de Bristol	Laboratorio			
	<p><i>Atenuadores:</i> tiene una dimensión mucho mayor que los absorbedores, se colocan de forma paralela a la dirección de avance de la ola. Son bastante estables ya que las fuerzas a ambos lados de la estructura se compensan (Castiella, 2013).</p>	Pelamis	Centro Europeo de Energías Marinas LTD	Comercial		
		<p><i>Totalizadores o terminadores:</i> se colocan poniendo la dimensión de mayor tamaño del dispositivo perpendicular a la dirección del avance de las olas, recogiendo así una superficie de ola mucho mayor que los dos anteriores. Requieren de un sistema de amarre más resistente que los atenuadores (Castiella, 2013).</p>	OYSTER	Centro Europeo de Energías Marinas		Piloto
			WaveRoller	AW-Energy Oy		Piloto
			Langlee Wave Power	Islas Canarias		Laboratorio
			BioWave	BioPower Systems		Piloto
	Salter Duck	Universidad de Edimburgo	Laboratorio			
	<p><i>Overtopping:</i> se colocan en la costa y tiene un dispositivo que se lleva con el agua de las olas que suben por una rampa situada a un nivel más alto que el mar circundante. La energía del agua que fluye de vuelta al mar se utiliza para accionar una turbina hidráulica (Cascajo et al., 2019).</p>	Wave Dragon	Wave Dragon ApS	Comercial		
		OBREC	Italia	Piloto		
		TAPCHAN	Norwave	Piloto		
		Seawave Slot-Cone Generator	WAVEenergy As	Piloto		

Como se puede observar en la Tabla 2, el aprovechamiento de la energía del océano sigue siendo una industria en desarrollo, donde tan solo 17 de los 51 dispositivos reportados en artículos (33%) han alcanzado la escala comercial, mientras que 25 de ellos están en fase piloto, lo anterior representa el 49% de las tecnologías de generación de extracción de energía oceánica que se encontraron en la literatura. A escala laboratorio se tienen 9 dispositivos, lo que representa el 18%.

La mayor cantidad de dispositivos de aprovechamiento de la energía oceánica que se tienen reportados en la literatura, Tabla 2, son aquellos cuya extracción se realiza convirtiendo la energía contenida en las olas, estos representan el 57% de las tecnologías, seguidas de los que aprovechan las corrientes marinas (25%) y las mareas (10%), siendo los sistemas menos desarrollados los de gradiente térmico (8%), mientras que no se encontró ningún dispositivo que aprovechará el gradiente salino para la conversión de energía.

Dentro de los dispositivos de energía undimotriz, la distribución de las 29 tecnologías reportadas en la literatura de acuerdo a su método de extracción de la energía es: 11 dispositivos son del tipo columna oscilante de agua, de los cuales cuatro se encuentran en escala comercial y siete en fase piloto, 8 son del tipo absorbedor puntual, donde dos trabajan a escala comercial, cinco están en fase piloto y uno en laboratorio. También se encontró que hay 5 dispositivos del tipo totalizador, tres en fase piloto y dos en escala laboratorio, a la fecha existen 4 dispositivos del tipo overtopping, de los cuales tres están en escala piloto y uno en escala comercial, mientras que del tipo atenuador solo se encontró 1 dispositivo a escala comercial.

De las 13 tecnologías reportadas que extraen energía a través de las corrientes marinas, las turbinas de corriente de flujo axial son los dispositivos con mayor desarrollo, puesto que se reportan 10 dispositivos, uno a escala comercial, seis a escala piloto y 3 a escala de laboratorio. Mientras que, para las turbinas de flujo vertical, de perfil hidrodinámico oscilante y del tipo cometa corriente, se reportan uno de cada uno a escala laboratorio.

En lo que respecta a los dispositivos de aprovechamiento maremotriz, los 5 reportados son del tipo Presas de Marea y se encuentran en escala comercial, y los de gradiente térmico son 4, dos a escala comercial y dos a escala piloto, los cuales utilizan un sistema de ciclo cerrado del tipo OTEC.

En la Tabla 2, también se puede observar que son los países europeos los que mayor desarrollo en cuanto a aprovechamiento de la energía oceánica tienen. Según IRENA (2020), de los 531 MW de energía máxima instalada a nivel mundial el 41% está distribuido entre diferentes países europeos entre los que destacan: Dinamarca, Reino Unido, Francia, Italia, Portugal, España, Noruega, Holanda y Suiza (IRENA, 2020).

### 2.1.2.1. ENERGÍA EÓLICA MARINA

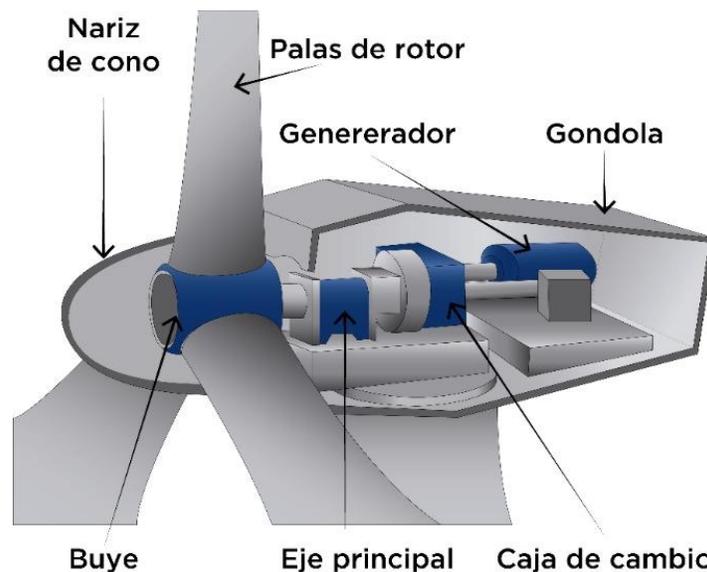
De acuerdo a la Tabla 1, la energía eólica es aquella que se obtiene del viento, proviene de la energía cinética generada por el movimiento de las masas de aire que se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas (Romera, 2010).

Tradicionalmente la energía eólica marina no está considerada como una energía oceánica, sin embargo, esto ha ido cambiando debido a que su entorno es igual y sus limitaciones similares a las energías del océano, específicamente a la mareomotriz, por lo que se consideran dentro de las energías oceánicas (Esteban y Leary, 2012).

La energía eólica marina es, similar a la energía eólica terrestre, una aplicación de la fuerza producida por el viento. La energía eólica marina es de mejor calidad, en comparación con su homólogo en tierra, ya que el viento se encuentra con una superficie de rugosidad variable, las olas, y sin obstáculos como islas, islotes, lo que implica que la velocidad del viento no experimenta grandes cambios. Además, el viento es, por lo general, menos turbulento que en tierra, con lo que se amplía el periodo de trabajo útil de un aerogenerador, que podría compensar los mayores costos de instalación y operación (Breton y Moe, 2009; Romera, 2010; Esteban et al., 2011).

Los aerogeneradores de eje horizontal son los sistemas más comunes, debido a que tienen un mejor rendimiento en la generación de electricidad (Sun et al., 2012; Kadiyala et al., 2017). Estos están compuestos por una turbina eólica que transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica, una estructura de soporte y la instalación para la distribución de la energía (Guezuraga et al., 2012; Vargas et al., 2015).

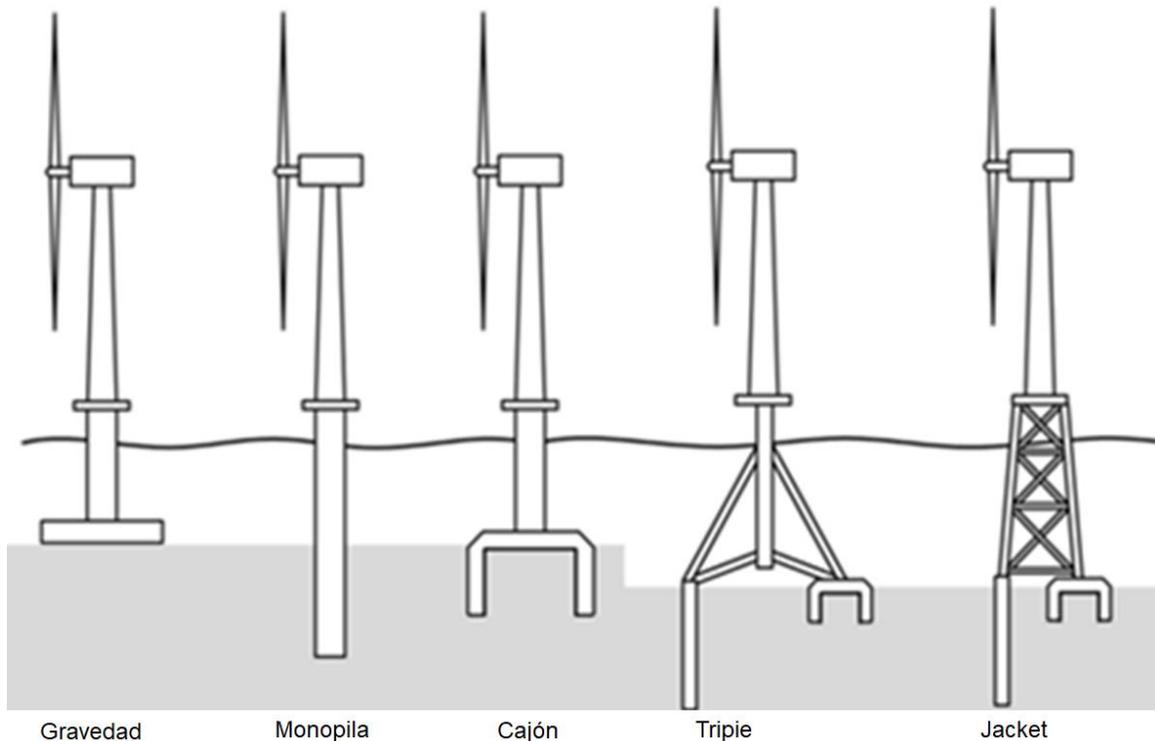
Las turbinas eólicas marinas son parecidas a las que hay en tierra, con modificaciones específicas para el entorno marino: protección contra la corrosión; protección interna contra el clima; pintura exterior de alta calidad, entre otras. La estructura de soporte consiste en una torre y cimientos que soportan a los dos componentes principales de una turbina de viento: (1) rotor: que consta de un cubo, tres palas, fabricadas principalmente de fibra de vidrio y resina epoxica, unidas por medio de un buje y un eje principal a traves del cual se transmite la energía, y (2) la góndola, normalmente integrada por un bastidor que cubre el generador, la caja de cambios, los transformadores y el equipo eléctrico y mecánico (Lenzen y Munksgaard, 2002; Sun et al., 2012; Vargas et al., 2015; Pliego et al., 2016; Loza et al., 2019), como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2:** Componentes principales de una turbina de viento (adaptado de Sanz, 2012a).

A pesar de tener importantes ventajas sobre su contraparte en tierra, como la alta densidad de energía, menor turbulencia, menos quejas civiles debido al ruido, obstrucción del paisaje o que la energía eólica puede generar de un 20 a 40% más ingresos energéticos que las turbinas eólicas terrestres, todavía existen grandes desafíos para esta tecnología, como lo son: el cableado submarino, las estructuras de soporte y el tipo de cimentación, los cuales dependen de la profundidad a la que se planeen instalar las turbinas (Breton y Moe, 2009; Zhixin et al., 2009; Romera, 2010; Oh et al., 2018), así como de la altura adecuada, de acuerdo a cada sitio, para maximizar la extracción de energía (Sun et al., 2012; Vargas et al., 2015; Pliego et al., 2016; Topham et al., 2019).

De acuerdo a la profundidad marina de la cimentación utilizada, éstas se clasifican generalmente en tres clases: (a) aguas poco profundas: son aquellas que van desde los 0 a los 30 metros; (b) aguas de transición: de los 30 hasta los 50 metros; y (c) aguas profundas: que se consideran desde los 50 hasta los 200 metros. La profundidad del mar es el factor más importante para la viabilidad de los parques eólicos marinos, porque la inversión aumenta conforme aumenta la profundidad (Zhixien et al., 2009; Oh et al., 2018). La Figura 3 muestra los tipos de cimentación.



**Figura 3:** Tipos de cimentación (adaptado de Oh et al., 2018).

Las cimentaciones mostradas en la Figura 3, se explican a continuación de acuerdo a lo reportado en la literatura por Zhixien et al. (2009) y Oh et al. (2018):

- a. Gravedad: consiste en un pilar circular como estructura que sostiene a la turbina con una placa de concreto que descansa sobre el fondo del mar. La gravedad es la principal fuente para mantener la estructura en posición vertical. Son para aguas poco profundas
- b. Monopila: estas estructuras son utilizadas en aguas poco profundas. El tipo de suelo recomendado son principalmente arena y grava, pues permiten asegurar su sustento. Son estructuras de acero con un diámetro entre 3.5 y 4.5 metros. Actualmente son las estructuras más utilizadas para aguas poco profundas.
- c. Cajón: replica un cubo invertido. Se cree que son una solución desde la perspectiva de la construcción e instalación. Sin embargo, aún no está claro si podrían ser adecuados para aguas en transición y/o profundas.
- d. Multipod (tripie/jacket): estas estructuras proporcionan suficiente capacidad de carga para aguas en profundidades de transición y profundas. Están basadas en la experiencia de la de las plataformas petroleras.

De igual forma se están desarrollando cimentaciones flotantes para las turbinas marinas, las cuales son dispuestas en cierto patrón geométrico usando cables que aseguren el amarre con la superficie marina y generen estabilidad. Se cree que este tipo de estructuras tienen muchas ventajas en aguas profundas, pues podrían reducir costos de construcción, instalación y desmantelamiento (Legung y Yang, 2012; Oh et al., 2018).

Las turbinas eólicas marinas varían en capacidad nominal, factor de capacidad, componentes y tipo de cimentación o soporte. El factor de capacidad expresa la relación de energía real generada y la estimada durante la generación máxima posible de una turbina. Una turbina con mayor capacidad produce más salida de energía eléctrica que aquella con menor factor operando en el mismo periodo de tiempo (Raadal et al., 2011; Raadal et al., 2014; Dolan y Heath, 2012).

## 2.1.2.2. ENERGÍA UNDIMOTRIZ

Como se ha mencionado la energía undimotriz es aquella que aprovecha el movimiento de las olas y permite a través de ello la obtención de otras fuentes de energía aprovechables para el ser humano, principalmente electricidad (Falcão et al., 2017; Sánchez, 2017; Patrizi et al., 2019). De entre las diversas energías renovables, se cree que esta tiene el potencial de sustituir parcialmente a los combustibles fósiles debido a algunas ventajas sobre otras fuentes alternativas de energía, como lo son su frecuencia, periodicidad, abundancia y previsibilidad (Alamain et al., 2017; Zhai et al., 2018; Patrizi et al., 2019).

El aprovechamiento de la energía de las olas, se lleva a cabo por dispositivos conocidos normalmente como WEC (*Wave Energy Converter*) por sus siglas en inglés (López et al., 2014; Falcão y Henriques, 2016; Do et al., 2017; Sánchez, 2017). El principio fundamental de estos dispositivos es la extracción de la energía cinética y/o potencial, contenida en el oleaje del océano (Do et al., 2017; Gastelum, 2017; Cascajo et al., 2019). En la mayoría de los casos, la energía undimotriz se convierte en electricidad mediante dos pasos: la conversión de la energía de las olas a una forma simplificada de energía mecánica y luego la transferencia de dicha energía a través de un mecanismo, generalmente conocido como toma de fuerza (PTO), a un colector o convertidor (López et al., 2014; Falcão y Henriques, 2016; Do et al., 2017; Patrizi et al., 2019; Shadman et al., 2019), de forma que comúnmente los WEC están constituidos por 3 módulos: (1) sistema o método de extracción de energía, (2) sistema de generación de energía y (3) estructura de soporte o amarre (López et al., 2014; Zhai et al., 2018; Patrizi et al., 2019).

Normalmente los WEC pueden clasificarse por su ubicación de instalación y su método de extracción de energía (Gastelum, 2017). Respecto a su ubicación, se dividen como: (i) en la costa, (ii) cerca de la costa y (iii) fuera de la costa (López et al., 2014; Delmonte et al., 2016).

Los WEC en la costa (*onshore*), están generalmente soportados por una obra civil y tienen la ventaja de estar cerca del punto de consumo, por lo que las operaciones de mantenimiento podrían realizarse de forma más rápida y barata; mientras que los cercanos a la costa (*nearshore*) son aquellos que se encuentran en aguas poco profundas, entre 10 y 30 metros de profundidad, y al igual que los ubicados en la costa tienen la ventaja de que al encontrarse cerca de los puntos de consumo los costos de transmisión y mantenimiento pueden reducirse, sin embargo, estos aumentan conforme se alejan de la costa (López et al., 2014; Sánchez, 2017; Cascajo et al., 2019). Los dispositivos fuera de costa (*offshore*) son aquellos que se encuentran en aguas con profundidades mayores a los 50 metros, tienen una mayor potencia, pero están más expuestos a las condiciones climáticas del océano, además que la interconexión a la red y el mantenimiento representan mayores costos de inversión (Delmonte et al., 2016; Sánchez, 2017).

Por otro lado, de acuerdo al método de extracción los dispositivos se pueden clasificar en cinco categorías diferentes: (i) atenuadores, (ii) absorbedores puntuales, (iii) terminadores, (iv) columna de agua oscilante (OWC por sus siglas en inglés *Oscillating Water Column*) y (v) *overtopping* o de rebase (Delmonte et al., 2016; Cascajo et al., 2019; Karan et al., 2019) las cuales se describieron brevemente en la Tabla 2. A continuación, se describirán con mayor detalle aquellos métodos de extracción que son de interés para este trabajo: absorbedor puntual y columna de agua oscilante.

- **Absorbedor Puntual**

Uno de los convertidores de energía de las olas más simples y populares es el tipo de absorbedor puntual (Do et al., 2017), para los cuales existen diversos diseños y arreglos para la conversión de energía. Este tipo de WEC consiste en una estructura flotante a través de la cual se absorbe la energía proveniente de todas las direcciones de la ola, debido su movimiento en la superficie del agua (Gastelum, 2017; Cascajo et al., 2019). Este tipo de dispositivos implica condiciones de flotación parcial, que permita que la estructura se mueva de arriba hacia abajo, y generalmente se colocan en dirección paralela a la ola predominante, de forma que se puede obtener mayor movimiento permitiendo mayor extracción de energía cinética, la cual se convierte a electricidad, por medio del PTO el cual puede ser mediante transmisión hidráulica o mecánica (Cascajo et al., 2019).

Como se mencionó anteriormente, los WEC están generalmente compuestos por tres módulos: sistema de captación, el sistema de generación y el sistema de amarra o soporte del dispositivo (López et al., 2014; Zhai et al., 2018; Patrizi et al., 2019). En el caso de los absorbedores puntuales el sistema de captación se conoce como módulo de la boya, en el cual se pueden utilizar diferentes tipos y modelos de boyas con el objetivo de extraer la mayor cantidad de energía posible. El módulo de generación, está conformado por los equipos necesarios para la transformación en energía eléctrica, los generadores pueden ser lineales o de flujo transversal. Por otra parte, el sistema de amarre puede variar dependiendo de diversos factores como: la localización a la que se planea instalar el dispositivo (*onshore*, *nearshore* u *offshore*) por lo que al igual que en las turbinas eólicas marinas puede ser una estructura fija o flotante, este último amarre está compuesto por una línea de amarre (cuerdas, alambres, cadenas o una combinación de estos) y un punto de anclaje, con el propósito de mantener el módulo de la boya en su lugar (Gastelum, 2017).

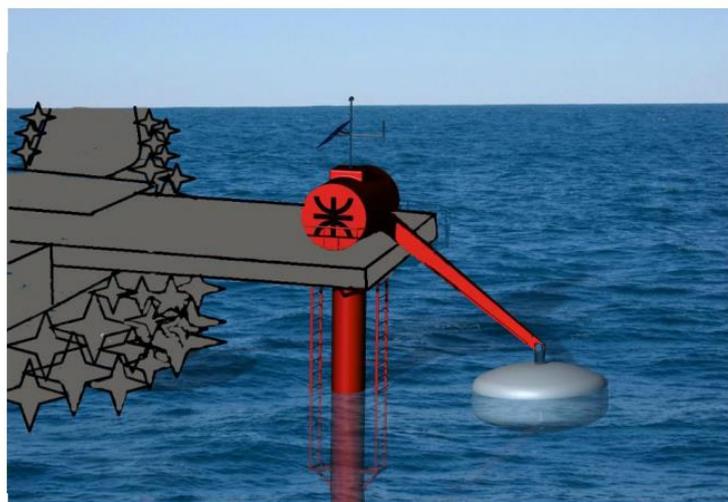
Los diseños de absorbedores puntuales más parecidos al que se presenta en este trabajo son: (1) el Wavestar WEC (Figura 4), desarrollado por la compañía Wavestar y la Universidad de Aalborg en Dinamarca, el cual se trata de una plataforma ubicada cerca de la costa a la cual están conectados una serie de flotadores, los cuales suben y bajan con el movimiento de las olas, captando la energía de las mismas. El movimiento de los flotadores se transfiere a través de un sistema hidráulico a la rotación de un generador (Dalton et al., 2014; Cascajo et al., 2019), (2) el convertidor hiperbárico instalado en el puerto de Pecém en Brasil (Figura 5), el cual está compuesto por un brazo mecánico que funciona como una palanca de manera que transfiere el desplazamiento de las olas desde el flotador hacia una cámara hiperbárica donde se acciona un sistema de hidráulico que transmite la energía al generador para su conversión en electricidad (Estefen et al., 2010; Shadman et al., 2019), (3) un dispositivo diseñado por la Universidad Tecnológica Nacional de Buenos Aires (UTN.BA), Argentina (Figura 6), el cual está constituido por una boya con brazo de palanca que apoya uno de sus extremos sobre una plataforma dentro de la escollera, junto al cual se tiene un sistema electromecánico que, unido a un generador, transforma el movimiento de las olas en energía eléctrica.



**Figura 4:** Wavestar WEC, Dinamarca (Dalton et al., 2014).



**Figura 5:** Central undimotriz Puerto Pecém, Brasil (Sanz, 2012b).

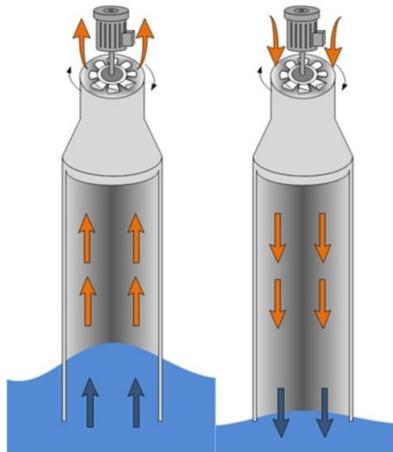


**Figura 6:** Generador de energía Undimotriz, Argentina (Jauregui et al., 2016).

El diseño y construcción de dispositivos de aprovechamiento undimotriz requiere la preparación de instalaciones en sitios específicos, lo que implica tiempo y costos. Un enfoque alternativo es la construcción de centrales undimotrices en escolleras o puertos, como es el caso del dispositivo diseñado por la UTN.BA y el instalado en Pecém, Brasil, representa varias ventajas: los costos se ven reducidos al ser compartidos con estructuras existentes, el acceso para la construcción, operación y mantenimiento de la planta de energía es mucho más sencilla (Falcão y Henriques, 2016; Cascajo et al., 2019; D'aquino et al., 2019). Sin embargo, el desarrollo de estos dispositivos no requiere solamente el conocimiento de su fabricación o el diseño para minimizar sus costos, también deben considerarse, como en todos los dispositivos, las afectaciones que tendrá sobre el medio ambiente (Gastelum, 2017).

- **Columna de Agua Oscilante**

En un dispositivo de extracción de energía undimotriz del tipo OWC, hay una estructura hueca fija o flotante, que involucra un cuerpo móvil parcial o totalmente sumergido, abierta al mar por debajo de la superficie del agua. Generalmente, se trata de una cámara donde se alterna la compresión y la descompresión de un fluido, típicamente aire, en respuesta a la incidencia de las olas (Delmonte et al., 2016; Falcão y Henriques, 2016; Falcão et al., 2017; Cascajo et al., 2019), tal como se muestra en la Figura 7.

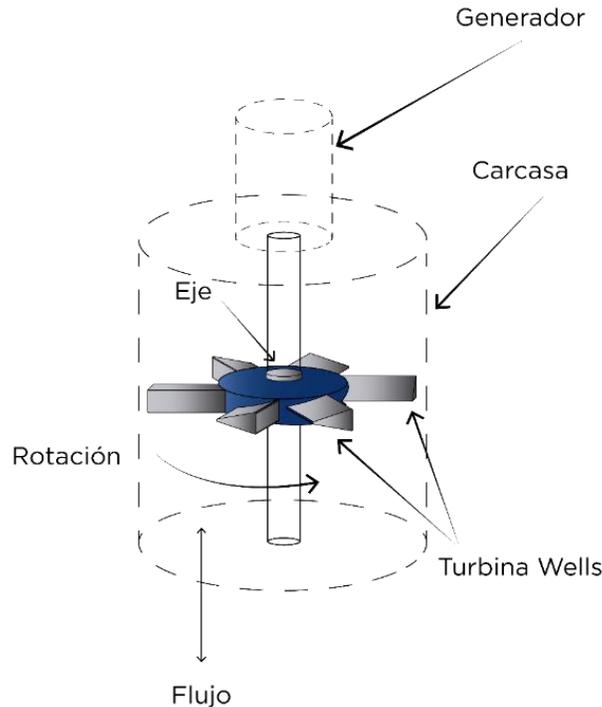


**Figura 7:** Funcionamiento típico de un sistema de extracción de energía undimotriz tipo OWC (D'aquino et al., 2019).

En estos sistemas, hay tres procesos de conversión de energía que conforman el sistema de generación: i) el proceso hidrodinámico de conversión de la energía de las olas en energía neumática en la cámara de aire que tiene lugar debajo de la superficie libre de agua; ii) el proceso aerodinámico de conversión de la energía neumática en energía mecánica en el eje del generador que tiene lugar en la turbina; y iii) el proceso eléctrico de conversión de la energía del eje en energía eléctrica suministrada a la red que tiene lugar en el equipo eléctrico (especialmente en el generador eléctrico) (Falcão et al., 2017).

En muchos de los dispositivos WEC, es fundamental, el sistema de captación y como se entrega la energía al sistema de conversión. En el caso de los OWC el cambio de presiones del fluido dentro de la cámara de resonancia resulta crítico para lograr el buen rendimiento (López et al., 2014), al igual que el sistema de toma de fuerza, el cual, como se observa en la Figura 7, se encuentra generalmente en la parte superior de la tubería donde la transformación de la energía se realiza, típicamente, mediante una turbina tipo Wells (Okuhara et al., 2013; D'aquino et al., 2019).

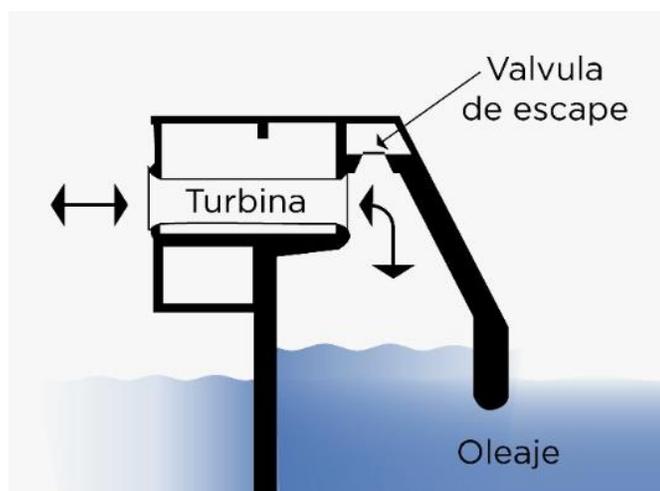
La turbina Wells es probablemente una de las más simples y económicas de las turbinas para la conversión de energía de las olas. Está compuesta por un rotor de paso fijo simétrico, una superficie de sustentación, cuchillas escalonadas a  $0^\circ$  en relación con el plano de rotación alrededor del cubo, tal como se puede observar en la Figura 8. Debido al uso de cuchillas simétricas de perfil aerodinámico sobre la línea de acordes, la turbina de Wells gira en la misma dirección que el flujo de salida de OWC que se invierte cíclicamente (Okuhara, 2013; Soltanmohamadi y Lakzian, 2016).



**Figura 8:** Turbina tipo Wells (adaptado de Soltanmohamadi y Lakzian, 2016).

Las turbinas tipo Wells más comunes en este tipo de sistemas son las denominadas auto reguladoras, puesto que son capaces de mantener el mismo sentido de rotación a pesar de los flujos de aire alternos. Actualmente existen otros desarrollos alternativos a las turbinas Wells que buscan mejorar la eficiencia, así como otros problemas en el arranque y el ruido de estas, sin embargo, aún ninguno se encuentra en desarrollo comercial y sus mejoras aún no han sido demostradas (Delmonte et al., 2019).

Los arreglos más comunes para la extracción de energía undimotriz a través de un sistema tipo OWC son los desarrollados en la línea costera, principalmente haciendo uso de estructuras de los muelles, y se basan en un cajón de concreto con el fondo abierto al mar donde se crea la cámara de aire que acciona la turbina tipo Wells (Delmonte et al., 2016), tal como se muestra en la Figura 9. Sin embargo, también existen dispositivos que se han propuesto para altamar con una amplia gama de configuraciones, donde el sitio más común es para aguas poco profundas (Falcão y Henriques, 2016).



**Figura 9:** Arreglo típico de un sistema OWC en línea costera (adaptado de Falcão et al., 2017).

Para las diferentes tecnologías tipo WEC, independiente del sistema de extracción a utilizar, existen factores relevantes a considerar como lo son las características del sitio de instalación, si se trata de un dispositivo en la costa, cerca o fuera de ella, así como la profundidad, las condiciones meteorológicas, del fondo marino, que pueden afectar el rendimiento del dispositivo (Alamain et al., 2017; Gastelum, 2017; D’aquino et al., 2019). De igual forma hay que existen barreras que han impedido el despliegue de estos sistemas como los problemas tecnológicos, la incertidumbre en los resultados, los altos costos de instalación y mantenimiento (Delmonte et al., 2016).

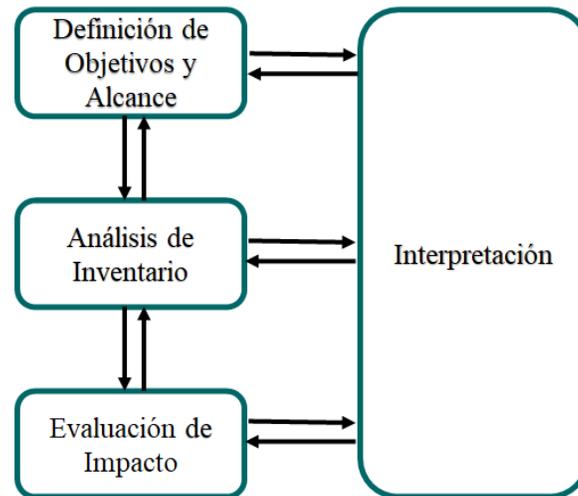
A pesar de los retos mencionados anteriormente, existen diversos factores para impulsar las tecnologías de la producción de energía a través del océano, por ejemplo, la reducción de emisiones de dióxido de carbono, lo cual va de acuerdo con los ODS. Por otra parte, no hay que olvidar que a pesar de lo que comúnmente se cree respecto a que las energías del océano, que tienen bajos o nulos impactos sobre el medio ambiente por lo que son consideradas energías limpias (Esteban et al., 2011; Panwar et al., 2011; Esteban y Leary, 2012), se trata de estructuras artificiales, lo que significa cambios sobre el ecosistema y puede tener efectos adverso sobre la vida silvestre y el medio donde se colocan (Sun et al., 2012; Candel, 2014; Piasecka et al., 2019), por lo que tampoco se puede dejar pasar el impacto ambiental asociado de manera directa e indirecta al consumo de diferentes insumos, materias primas y energía, así como la generación emisiones, efluentes y residuos sólidos, los cuales tienen un impacto directo sobre el agotamiento de los recursos naturales, el cambio climático, el agotamiento de los combustibles fósiles, entre otros impactos (Rule et al., 2009; Paredes et al., 2019; Pennoch et al., 2021), para los cuales la metodología de de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), ha demostrado ser una herramienta que ayuda a identificar los posibles impactos ambientales en cada una de las etapas de un sistema de energía del océano, permitiendo detectar donde se pueden implementar mejoras ambientales.

### 2.1.3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El ACV es un enfoque metodológico, el cual se define, de acuerdo a la Norma ISO 14040 (ISO, 2006), como: “una metodología para determinar los efectos en materia ambiental asociados a un producto o servicio: compilando un inventario de entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando su potencial impacto ambiental, e interpretando los resultados del análisis de cada etapa de vida del producto en relación con los objetivos planteados.”

Un estudio de ACV requiere de la recolección de información de las entradas (materias primas, insumos y energía) necesarias, así como de las salidas (productos, efluentes, emisiones al aire, y residuos sólidos) generadas en cada etapa de desarrollo, del sistema estudiado.

La metodología de ACV fue desarrollada en la década de 1970, y esta estandarizada por la Organización Internacional de Estandarización, a través de la norma ISO 14040/44 (2006), en la que se describen cada una de las cuatro etapas que la conforman, tal como se muestra en la Figura 10.



**Figura 10:** Metodología de ACV (adaptado de ISO 14040, 2006).

A continuación, se detallarán cada una de las etapas de la metodología de ACV.

### 2.1.3.1. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE

Esta primera etapa consiste en definir el objeto de estudio, la aplicación prevista, las razones del estudio y la audiencia a quién está dirigido. En esta fase no hay recolección de datos ni cálculo de resultados, sino más bien es donde se establece el plan de trabajo de un ACV de manera clara e inequívoca para el cual deben tenerse en cuenta los puntos fundamentales que son: las funciones del sistema, la unidad funcional, los límites del sistema, los procedimientos de asignación, en caso de ser necesarios, así como los tipos de impacto y la metodología que se utilizara para evaluarlos e interpretarlos (Curran, 2012).

Es de suma importancia dentro de esta fase establecer la unidad funcional, la cual expresa la función del producto y es la medida del sistema estudiado a la cual hacen referencia todas las entradas y salidas del sistema permitiendo la comparación entre dos o más. Su definición debe ser precisa y suficientemente comparable (Curran, 2012).

### 2.1.3.2. INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

En esta fase, a través de la recopilación de datos y diversos procedimientos de cálculo, se cuantifican las entradas (materias primas, insumos y energía) y salidas (emisiones, efluentes, residuos sólidos), llegando hasta los flujos elementales, de cada proceso unitario que componen el ciclo de vida del producto y que han sido definidos de acuerdo a los objetivos y alcances, especificados en la primera fase del estudio (ISO, 2006).

Los datos recolectados deben ir referenciados a la unidad funcional, pues son la base del ACV y el punto de partida para la siguiente fase: Evaluación de Impacto.

### 2.1.3.3. EVALUACIÓN DE IMPACTO

Esta etapa tiene como propósito identificar, caracterizar y cuantificar los posibles efectos sobre el medio ambiente del sistema estudiado. En esta fase se relacionan los resultados del inventario con los efectos ambientales que dan lugar con el fin de valorar la importancia de los potenciales impactos que se generan, para ello se puede emplear diferentes metodologías. Estas metodologías cumplen el objetivo de conectar, en la medida de lo posible, cada resultado del inventario de ciclo de vida con las posibles cargas ambientales, clasificando estos resultados en diferentes categorías de impacto (Curran, 2012).

Algunos de los métodos de evaluación de impacto son CML 2016, Eco-indicador 99, IMPACT 2002+, ReCiPe, entre otros. Cada uno de ellos buscan modelar los efectos causados por el proceso estudiado y se pueden abordar desde dos perspectivas diferentes: los modelos de punto medio (midpoint) o los modelos de punto final (endpoint), los cuales se presentan en la Figura 11. A través de estos modelos se establecen los vínculos entre las intervenciones ambientales (extracción de materiales y emisiones, por ejemplo) contabilizadas en el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) y sus potenciales impactos (Sonnemann y Vigon, 2011).

Las categorías de impacto a nivel punto medio reflejan una relación causa y efecto, de forma que se evalúa la magnitud del impacto generado de manera directa sin tomar en cuenta las repercusiones posteriores que se ocasionan a la salud humana o al ecosistema. Por otra parte, las categorías a nivel de punto final analizan los daños que se generan a los componentes finales un mecanismo ambiental (Sonnemann y Vigon, 2011; Lujan, 2015).

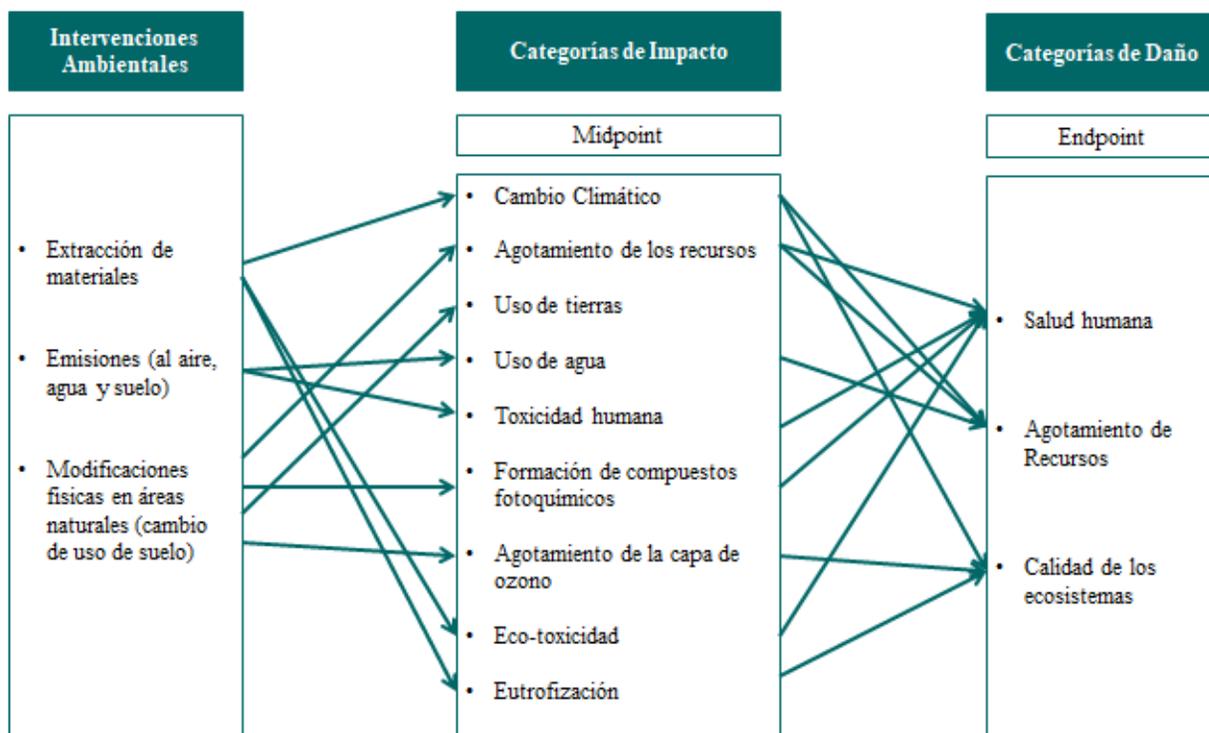


Figura 11: Método del punto medio (adaptado de Sonnemann y Vigon, 2011).

Como se mencionó, las categorías de impacto en el modelo de punto medio reflejan una relación de causa y efecto, lo anterior con el objetivo de describir adecuadamente la interacción de los principales flujos de materia y energía que integran el inventario de ciclo de vida del sistema estudiado, con el objetivo de valorar la importancia de los potenciales efectos que se generan (Curran, 2012). La Tabla 3, presenta las categorías de impacto de punto medio utilizadas en la metodología ReCiPe, así como su descripción de acuerdo a Goedkoop (2009). Se trabaja con dicha metodología, puesto que es la que genera modelos de calculo mas cercanos a la intervención ambiental (Vallejo, 2004; Zamorano, 2019).

**Tabla 3:** Categorías de Impacto a punto medio de la metodología ReCiPe (Goedkoop, 2009).

Siglas	Categoría	Unidad	Descripción
CC	Cambio climático	kg (CO <sub>2</sub> al aire)	Asociada a la emisión de gases de efecto invernadero que participan en el cambio climático.
AO	Agotamiento de Ozono	kg (CFC-11 al aire)	Se refiere a la destrucción de la capa de ozono, debido al uso de clorofluorocarbonos.
A	Acidificación	kg (SO <sub>2</sub> al aire)	Se refiere a la acidificación de los suelos.
E	Eutrofización de agua dulce	kg (P al agua)	Enriquecimiento de nutrientes en ambientes acuáticos continentales.
EM	Eutrofización marina	kg (N al agua)	Enriquecimiento de nutrientes en ambientes marinos.
TH	Toxicidad Humana	kg (1,4-DCB al aire urbano)	Emisión de sustancias consideradas toxicas para la especie humana, considera como medio a las áreas urbanas.
POF	Potencial de oxidación fotoquímica	kg (NMVOC al aire urbano)	Asociada a la emisión de sustancias relacionadas a la formación de ozono en la troposfera.
FMP	Formación de materia particulada	kg (PM10 al aire)	Emisiones de materia particulada fina y de sustancias asociadas.
ET	Ecotoxicidad	kg (1,4-DCB al suelo)	Emisión de sustancias consideradas toxicas para la especie humana, considera como medio a los suelos industriales.
ETA	Eco-toxicidad acuática	kg (1,4-DCB al agua)	Emisión de sustancias consideradas toxicas para la especie humana, considera como medio a los cuerpos de agua continentales.
ETM	Eco-toxicidad marina	kg (1,4-DCB al agua marina)	Emisión de sustancias consideradas toxicas para la especie humana, considera como medio a los cuerpos de agua marina.
RI	Radiación ionizante	kg (U235 al aire)	Asociado a la liberación de material radiactivo al ambiente.
OTA	Ocupación de tierra agrícola	m <sup>2</sup> -año (Tierra agrícola)	Terrenos agrícolas utilizados durante un periodo de tiempo
OTU	Ocupación de terreno urbano	m-año (Terreno urbano)	Terreno urbano utilizado durante un periodo de tiempo

**Tabla 3:** Categorías de Impacto a punto medio de la metodología ReCiPe (Goedkoop, 2009) (Continuación).

Siglas	Categoría	Unidad	Descripción
TTN	Transformación de terreno natural	m <sup>2</sup> (terreno natural)	Asocia la destrucción de hábitats a la transformación de zonas naturales.
AA	Agotamiento de agua	m <sup>3</sup> (Agua)	Agua utilizada por los procesos del sistema.
AM	Agotamiento de recursos minerales	kg (Fe)	Utilización de minerales.
ACF	Agotamiento de combustible fósil	kg (Petróleo)	Utilización de derivados del petróleo y otros combustibles fósiles como el carbón y el gas natural.

La relación entre las diferentes categorías de impacto y los flujos de materia y energía generados en el proceso se clasifican, lo cual implica que todas las intervenciones ambientales que se identifican en el inventario de ciclo de vida se relacionan con los impactos ambientales y se les agrupa en las diferentes categorías de impacto, esta clasificación responde a la pregunta ¿A qué contribuye esta emisión?, y posteriormente caracteriza la emisión dando como resultado una magnitud equivalente de esa entrada o salida en la unidad de referencia de la categoría de impacto, este proceso se realiza mediante los factores de caracterización (Curran, 2012). Este proceso se suele realizar con ayuda de un software especializado.

Los factores de caracterización de cada sustancia, representan su contribución a una determinada categoría de impacto en relación a la sustancia de referencia de esa categoría. Cada sustancia seleccionada se multiplica por su correspondiente factor, logrando de este modo llegar a una magnitud con unidades equivalentes y así cuantificar su contribución dentro de cada una de las categorías de impacto (Olivera et al., 2016). Ejemplo de ello es la conversión de los diferentes GEI en emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, como se muestra en la Tabla 4, unidad reconocida como base en la cuantificación del cambio climático.

**Tabla 4:** Factores de caracterización para la categoría de cambio climático.

Sustancia	Factor de caracterización [kg CO <sub>2</sub> equivalente]	
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1
Metano	CH <sub>4</sub>	21
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	298
Hidrofluorocarbonos	CFCs	124 – 14800
Hexafluoruro de azufre	SF <sub>6</sub>	22 800

Dentro de un ACV se pueden considerar todas las categorías de impacto presentadas en la Tabla 3, aunque debido a la naturaleza del sistema estudiado este puede implicar mayor relevancia en unas que en otras y por esa razón tan solo seleccionarse las consideradas como significativas.

### 2.1.3.4. INTERPRETACIÓN

En esta fase se presenta una evaluación sistemática de las necesidades y oportunidades que existen dentro del sistema estudiado para reducir las cargas ambientales asociadas al mismo. En esta etapa se combinan los resultados del inventario con los de la evaluación de impacto para proporcionar resultados coherentes con el objetivo y alcance definidos anteriormente, con la finalidad de ofrecer conclusiones y explicando las limitaciones (Curran, 2012).

## 2.2. ANTECEDENTES

El aprovechamiento del recurso energético contenido en los océanos, es una de las principales estrategias para reducir las emisiones de carbono, sin embargo, como se mostró en la Tabla 2, no todos los sistemas de captación están en etapas de despliegue comercial (Montero y Calvo, 2013). Debido a la mayor conciencia que se tiene sobre los impactos ambientales que producen las actividades antropogénicas y la rápida expansión de la industria de las energías del océano, actualmente la identificación de los efectos sobre el medio marino y sus interacciones es un tema importante a considerar en la planificación del despliegue de estas tecnologías. A continuación, se muestra una revisión bibliográfica sobre los impactos ambientales de las energías del océano.

### 2.2.1. IMPACTOS AMBIENTALES DE LAS ENERGÍAS DEL OCEANO

Utilizar energía oceánica, implica la introducción de diferentes dispositivos que capten la energía contenida en los ecosistemas marinos, los cuales son menos conocidos, lo que significa que los impactos ambientales que se ejercen sobre son difíciles de predecir, añadiendo un reto más al desarrollo de este tipo de energía (Hammar et al., 2017; Mendoza et al., 2019).

Los impactos ambientales directos e indirectos sobre el medio marino están asociados a las estructuras de soporte que representan barreras masivas en las corrientes naturales, además de los materiales y la energía necesarios para estos. Aunque hace falta investigación, existe una preocupación sobre cómo estas nuevas tecnologías generan alteraciones en la biodiversidad debido al ruido, la contaminación química y biológica, entre otros efectos adversos sobre el medio ambiente que se puedan producir (Posso 2002; Sun et al., 2012; Montero y Calvo, 2013; Dahane et al., 2017; Paredes et al., 2019).

De manera general, algunos de los potenciales impactos ambientales relacionados con el uso de dispositivos de obtención de energía del océano identificados por la literatura son: cambios en el paisaje marino, reducción del movimiento o circulación del agua, daño físico como ruido submarino, dispersión de sedimentos e introducción de sustratos lo que genera efectos sobre sistemas biológicos como los arrecifes, daños a la diversidad por cambios en las rutas migratorias o muerte de especies como aves y peces por colisión, contaminación química del agua, cambios en la topografía o geología del sitio, efectos electromagnéticos y contaminación térmica (Sun et al., 2012; Ellabban et al., 2014; Kaldellis et al., 2016; Félix et al., 2019; Hernández et al., 2019; Mendoza et al., 2019).

De igual forma, existen posibles impactos positivos por la introducción de este tipo de tecnologías, ejemplo de ello son los definidos como “efecto arrecife”, el cual consiste en la colonización de las estructuras o cables por organismos bentónicos, y “efecto reserva”, que se debe principalmente a la política pública que establece a las granjas de energía como espacios exclusivos, prohibiendo de esta forma otras actividades como la pesca, la explotación petrolera y/o el tránsito marino permitiendo el desarrollo de especies marinas (Taormina et al., 2018). En el caso específico de la energía undimotriz Ozkan et al. (2020) afirman que la extracción de este tipo de energía a través de dispositivos tipo WEC tiene un impacto positivo en la morfología costera puesto que reduce la erosión, ya que actúan como una barrera física contra el ataque de las olas.

Es importante reconocer que la evaluación de impacto ambiental sobre áreas marinas es una tarea compleja, que depende no solo del entendimiento del ecosistema marino: su resiliencia, resistencia, los servicios que presta, sino también de los dispositivos de conversión de energía, su modo operativo, sus procesos de elaboración e instalación y su uso (Mendoza et al., 2019), sino también del hecho que existen otras actividades humanas que utilizan el mismo espacio y afecta el mismo entorno (Hammar et al., 2017).

Debido a todo lo que anteriormente se ha presentado, la evaluación del impacto ambiental de las tecnologías de captación de energía a través del océano deben realizarse a detalle considerando las condiciones locales como biodiversidad, circulación de las corrientes o fondo marino, así como el funcionamiento del dispositivo y las posibles perturbaciones en diferentes periodos de tiempo, lo que implica el monitoreo permanente de los sistemas, con el fin de recolectar información sobre su funcionamiento y respuesta ante los cambios producidos por los dispositivos utilizados.

El ACV es una herramienta altamente utilizada para conocer los impactos ambientales. Las energías del océano han sido igualmente evaluadas a través de esta metodología. Sin embargo, la mayoría se centra en la categoría de impacto de Cambio Climático, realizando un análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub> y la energía requerida para la producción de los dispositivos analizados, donde en su mayoría son dispositivos tipo WEC (Paredes et al., 2019).

### 2.2.1.1. ACV DE ENERGÍA EÓLICA MARINA

En lo que respecta a energía eólica marina se puede, por un lado encontrar estudios donde se evalúan exclusivamente las emisiones de GEI para aerogeneradores de diferentes capacidades y tipos de cimentación (Wiedmann et al., 2011; Ortegon et al., 2013; Reimers et al., 2014; Raadal et al., 2014; Bonou et al., 2016; Zhao et al., 2017; Wang et al., 2019) como se muestra en la Tabla 5, mientras que también estudios de análisis estadístico basados en revisiones bibliográficas, cuyo objetivo es armonizar los diferentes criterios encontrados para obtener las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente (Dolan y Heath, 2012; Kadiyala et al., 2017), y en los cuales se han mostrado que la variación entre los resultados depende entre varios factores como lo son: potencia nominal, el factor de capacidad y el sitio donde se instalan los equipos.

**Tabla 5:** Emisiones de GEI aerogeneradores offshore.

Referencia	Características			kg CO <sub>2</sub> equivalente/kWh (por turbina)
	Dimensiones	Potencia	Cimentación	
Wang et al., 2019	1 turbina	2 MW	Flotante	4.68E-01
Chipindula et al., 2018	1 turbina	2 MW	Monopila	9.49E-03
Zhao et al., 2017	33 turbinas	1.5 MW por turbina	-	9.09E-03
Bonou et al., 2016	1 turbina	4 MW	Monopile	1.10E-02
		6 MW		7.80E-03
Raadal et al., 2014	6 turbinas	5 MW por turbina	Jacket	1.89E-02
Reimers et al., 2014	1 turbina	5 MW	Jacket	1.68E-02
Ortegon et al., 2013	1 turbina	-	-	1.10E-02
Wang y Sun, 2012	100 turbinas	3 MW	Monopila	5.98E-03
Wiedmann et al., 2011	1 turbina	2 MW	-	1.34E-02
Vestas, 2007	1 turbina	3 MW	-	5.23E-03

También se han reportado diversos estudios en los que no solo se analizan las emisiones de CO<sub>2</sub> sino también otras categorías de impacto que se consideran importantes para determinar el desempeño ambiental de los dispositivos eólicos marinos, estos estudios se resumen en la Tabla 6.

**Tabla 6:** ACV de aerogeneradores offshore.

Referencia	Características						Categorías de Impacto							
	Dimensiones	Potencia	Cimentación	AM	CC	TH	Eco-toxicidad		POF	A	E	FMP	Eco point	DAE
							Humana	Agua dulce						
<b>Piasecka et al., 2019</b>	1 turbina	2 MW	Monopila										x	
<b>Yang et al., 2018</b>	27 turbinas 1 turbina	3.6 MW 5 MW	Monopila		x					x		x		x
<b>Huang et al., 2017</b>	52 turbinas	2 MW por turbina	Monopila										x	x
<b>Haapala y Prempreeda, 2014</b>	1 turbina	2 MW	Modular	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
<b>Wagner et al., 2011</b>	12 turbinas	5 MW por turbina	Jacket Tripod		x		x		x	x	x			x
<b>Weinzettel et al., 2009</b>	40 turbinas	5 MW por turbina	Flotante	x	x	x	x	x	x	x	x			
<b>Berrios et al., 2009</b>	1 turbina	2.5 MW	Monopila										x	
<b>Pehnt, 2006</b>	1 turbina	2.5 MW	-		x					x	x			x
<b>Schleisner, 2000</b>	10 turbinas	500 kW por turbina	-		x					x	x			

AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. CC: Cambio Climático. TH: Toxicidad Humana. POF: Potencial de Oxidación Fotoquímica. A: Acidificación. E: Eutrofización. DAE: Demanda Acumulada de Energía

## 2.2.1.2. ACV DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ

El propósito general de los estudios de análisis de ciclo de vida de diferentes dispositivos de generación de energía a través de las olas, se han centrado principalmente en aumentar el conocimiento sobre el desempeño ambiental de estas tecnologías con el objetivo de identificar las etapas y procesos donde se puedan implementar estrategias para el mejoramiento de los mismos (Dahlsten, 2009; Uihlein, 2016; Zhai et al., 2018). En este contexto, la categoría de impacto que evalúa las emisiones de gases efecto invernadero y el periodo de recuperación de energía son considerados como criterios importantes para cumplir este propósito (Banerjee et al., 2013).

En la Tabla 7, se puede observar los diferentes estudios de ACV de sistemas de extracción de energía undimotriz reportados en literatura, donde cabe resaltar que pocos incluyen otras categorías de impacto ambiental diferentes a la que se refiere a cambio climático (CC) (Thomson et al., 2011; Douziech et al., 2016; Uihlein, 2016; Karan et al., 2019; Thomson et al., 2019; Apolonia y Simas, 2021; Pennoch et al., 2021).

**Tabla 7:** ACV de sistemas de extracción de energía undimotriz.

Referencia	Dispositivo	Potencia	CC kg CO <sub>2</sub> eq/kWh	AO kg CFC-11 eq/kWh	A kg SO <sub>2</sub> /kWh	EM kg N eq/kWh	TH kg 1,4- DBC eq/kWh	FMP kg PM <sub>10</sub> /kWh	ETM kg 1,4- DCB eq/kWh	AM kg Fe eq/kWh	ACF kg oil eq/kWh
Thomson et al., 2019	Pelamis	750 kW	3.50E-02	3.70E-09	4.04E-04	1.40E-05	3.30E-02	1.84E-04	9.24E-04	2.60E-02	1.00E-02
Thomson et al., 2011		750 kW	2.4E-02 – 3.0E-02	2.30E-09	-	-	-	-	-	-	-
Parker et al., 2007		750 kW	2.30E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
Pennoch et al., 2021	Point absorber	10 MW*	3.44E-02	-	4.26E-04	1.98E-03	-	-	1.04E-03	-	9.63E-03
Gastelum et al., 2017		20 MW	3.0E-02 – 8.0E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
Dahlsten, 2009		20 kW**	3.9E-02 – 1.26E-01	-	-	-	-	-	-	-	-
Uihlein, 2016	Pelamis	Promedio 528 kW	4.40E-02	1.80E-03	-	1.00E-05	-	-	-	-	-
	Oyster		6.40E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
	OWC		4.50E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
	Point absorber		1.05E-01	4.20E-03	-	-	-	-	-	-	-
Karan et al., 2019	Oyster	800 kW	5.70E-02	2.50E-09	-	-	-	-	-	-	-
		315 kW	7.90E-02	3.20E-09	-	-	-	-	-	-	-
Douziech et al., 2016		800 kW	6.55E-02	6.32E-09	2.51E-04	1.92E-05	3.39E-02	1.43E-04	1.64E-03	5.38E-02	2.28E-02
Walker y Howell, 2011		315 kW	2.50E-02	-	-	-	-	-	-	-	-

\* Generación total instalada, la planta cuenta con 28 dispositivos.

\*\* Por dispositivo, pero se evaluó una planta de 20 MW.

CC: Cambio Climático. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. A: Acidificación. EM: Eutrofización Marina. TH: Toxicidad Humana. FMP: Formación de Material Particulado. ETM: Eco-Toxicidad Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles.

**Tabla 7:** ACV de sistemas de extracción de energía undimotriz (Continuación)

Referencia	Dispositivo	Potencia	CC kg CO <sub>2</sub> eq/kWh	AO kg CFC-11 eq/kWh	A kg SO <sub>2</sub> /kWh	EM kg N eq/kWh	TH kg 1,4- DBC eq/kWh	FMP kg PM <sub>10</sub> /kWh	ETM kg 1,4- DCB eq/kWh	AM kg Fe eq/kWh	ACF kg oil eq/kWh
<b>Apolonia y Simas, 2021</b>	MegaRoller	320 kW***	3.38E-02		-9.07E-05	1.10E-06			2.80E-03		
<b>Patrizi et al., 2019</b>	OBREC	3 kW	3.70E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Zhai et al., 2018</b>	Buoy rope drum	10 kW	8.90E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Dalton et al., 2014</b>	Wavestar	220 kW	4.70E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Banerjee et al., 2013</b>	Pelamis	750 kW	2.00E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
	Wave Dragon	7 MW	2.80E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Sørensen et al., 2009</b>	Wave Dragon	-	1.30E-02	-	-	-	-	-	-	-	-

\*\*\* La generación real, la capacidad nominal es de 1 MW.

CC: Cambio Climático. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. A: Acidificación. EM: Eutrofización Marina. TH: Toxicidad Humana. FMP: Formación de Material Particulado. ETM: Eco-Toxicidad Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. DEFINICIÓN DE ALCANCE

##### 3.1.1. FUNCIÓN DEL SISTEMA Y UNIDAD FUNCIONAL

Las tecnologías analizadas son: un aerogenerador offshore, un dispositivo undimotriz tipo absorbedor puntual, denominado boya con brazo, así como una planta de energía undimotriz cuyos dispositivos de extracción son del tipo columna de agua oscilante.

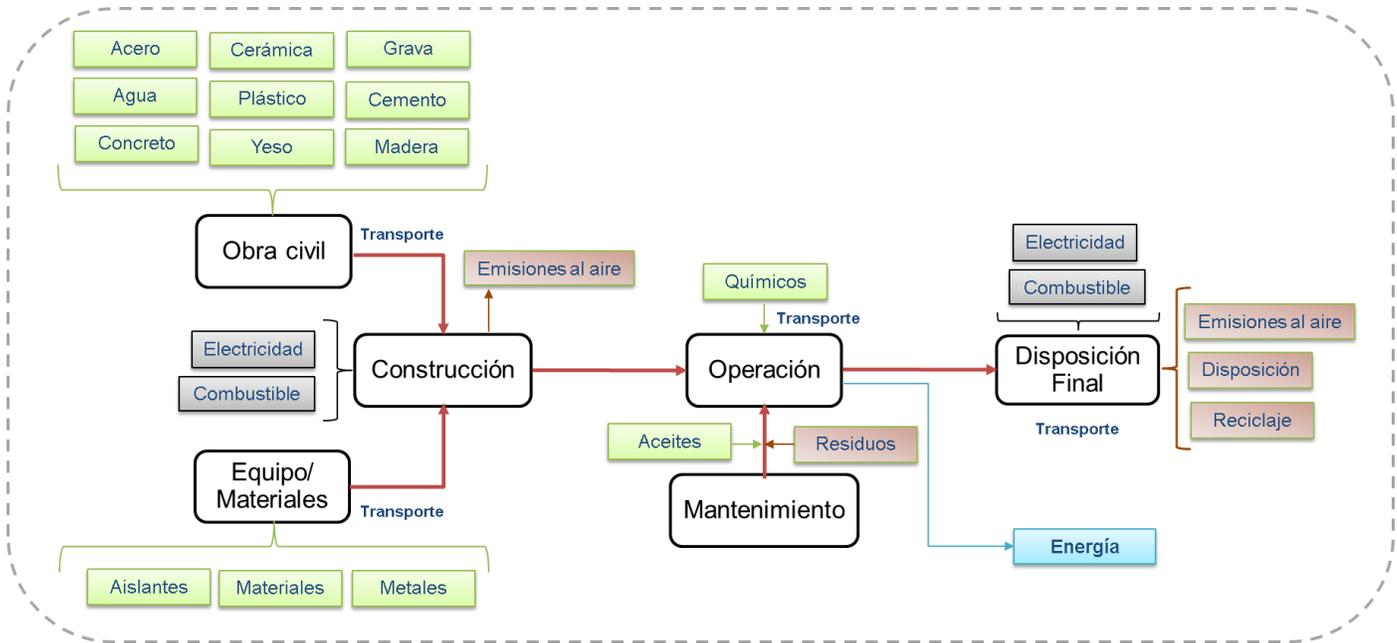
La función de dichos dispositivos es generar energía eléctrica a partir del océano. Debido a lo anterior la unidad funcional se definió como: 1 kWh de energía eléctrica generada mediante cada uno de los dispositivos evaluados se consideró, con un periodo de vida útil de 20 años.

El periodo de vida útil de cada uno de los dispositivos a analizar es diferente, debido a factores asociados al sitio de instalación. Sin embargo, se considera como 20 años de referencia, debido a que es el tiempo de vida de los aerogeneradores offshore y la vida útil comúnmente estimada para dispositivos de extracción de energía undimotriz como es el caso el dispositivo undimotriz de boya con brazo (Parker et al., 2007; Thomson et al., 2011; García et al., 2016; Uihlein, 2016; Huang et al., 2017; Zhai et al., 2018; Karan et al., 2019; Thomson et al., 2019; Apolonia y Simas, 2021) así como tiempo estimado de una turbina tipo Wells (Bruschi et al., 2019; Lekube, 2021), la cual es el tipo de tecnología utilizada para la generación de energía en la central undimotriz de Mutriku, España (Torre-Enciso et al., 2009; Torre-Enciso et al., 2010; Ibarra et al., 2018), esta consideración se hizo con la finalidad de hacer los dispositivos sean lo más comparables entre sí.

### 3.1.2. LÍMITES DEL SISTEMA

El presente trabajo considera a México como límite geográfico, aunque por la ausencia de información se considerarán fuentes de información y datos internacionales.

En los estudios de ACV de sistemas de energía renovable, en este caso particular de la energía del océano, no se debe ignorar que los procesos de manufactura e instalación de los equipos generan emisiones, es por ello que se identifican como etapas principales la construcción, operación y desmantelamiento. En la Figura 12, se esquematizan las etapas y los constituyentes del inventario de ciclo de vida de los diferentes sistemas de energía oceánica (Paredes et al., 2019).



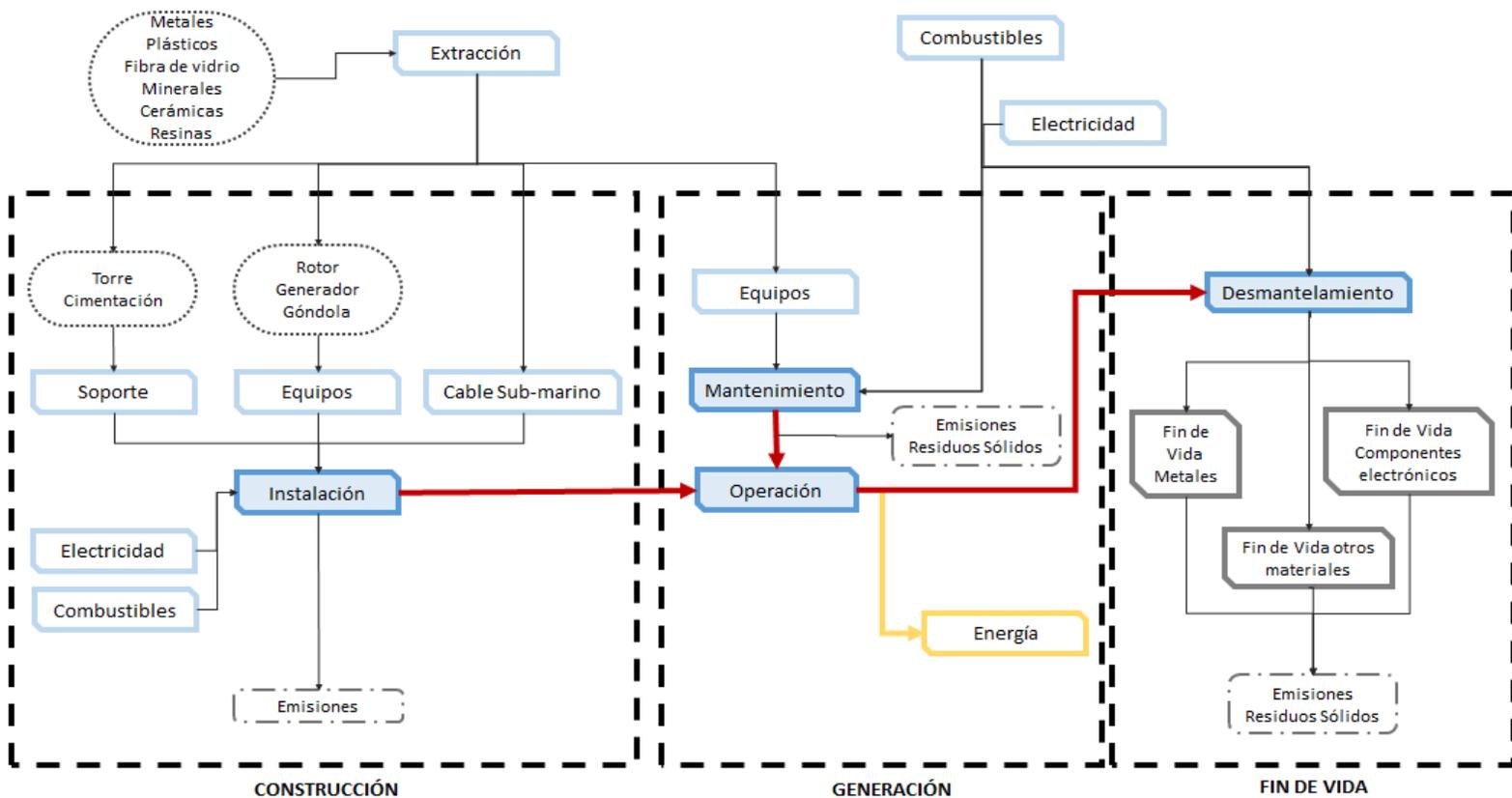
**Figura 12:** Etapas del ciclo de vida de dispositivos de energía del océano (adaptado de Paredes et al., 2019).

### 3.1.3. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS

A continuación, se muestran, de acuerdo a las etapas identificadas como principales (construcción, operación y fin de vida) los detalles de cada uno de los dispositivos de energía del océano a analizar.

#### 3.1.3.1. AEROGENERADOR OFFSHORE

Para los sistemas de energía eólica marina es importante tomar en cuenta las externalidades relacionadas a cada una de sus etapas, las cuales anteriormente se dijo son la construcción, la generación y el fin de vida. Cada una de estas se conforman por diferentes sub-etapas, ejemplo de ello son la fabricación de la tecnología, la instalación, el mantenimiento, así como los diferentes escenarios de disposición final que puedan existir para cada uno de los materiales e insumos utilizados en sus etapas previas. A continuación, se muestra un esquema (Figura 13) con las etapas y las diferentes sub-etapas que las conforman y se describen cada una de ellas.

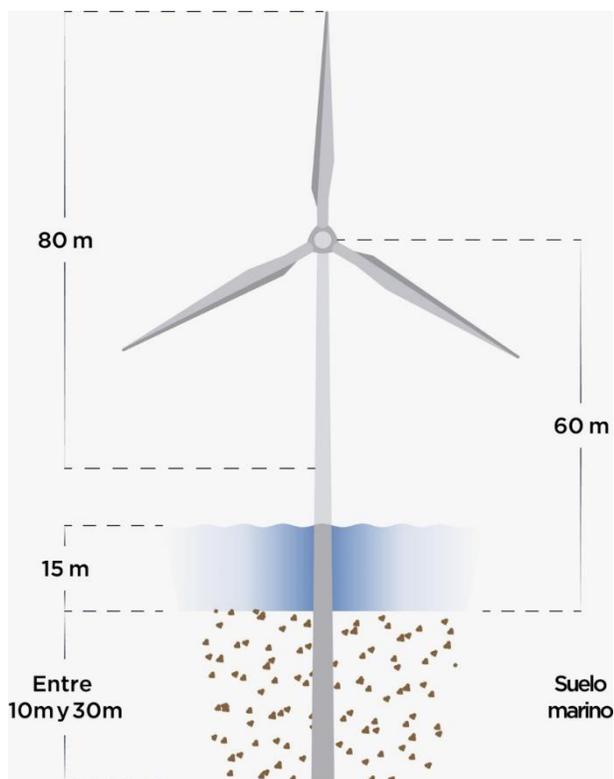


**Figura 13:** Esquema de ciclo de vida de un aerogenerador offshore.

- **Construcción**

Esta etapa comprende desde la extracción de materiales hasta las fases de producción y procesamiento de los diferentes equipos que integran la turbina eólica, la estructura de soporte, el cable necesario para la interconexión, así como el transporte y los combustibles fósiles necesarios para la instalación del aerogenerador en el océano (Raadal et al., 2011; Nuget y Sovacool, 2014; Ji y Chen, 2016). Para este trabajo, como se muestra en la Figura 13, las fases que integran la etapa de construcción son la extracción de materias primas necesarias para la fabricación de los equipos y componentes que integran la turbina, el soporte de la misma y el cable submarino, así como el transporte desde donde se fabricaron los equipos y los combustibles necesarios para la instalación en el sitio, el cual se asume que se llevará a cabo en la Isla Cervera, Yucatán, México.

Para este trabajo, las características físicas que se asume para el aerogenerador offshore, son una turbina de eje horizontal con estructura de soporte del tipo monopila, con cimentación de acero y concreto, configuración que es la más común para aguas poco profundas (Zhixin et al., 2009; Sun et al., 2012; Oh et al., 2013; Perveen et al., 2014; Kaldellis et al., 2016; Oh et al., 2018; Piasecka et al., 2019; Topham et al., 2019). Los componentes que integran la turbina de son: (1) el rotor, que consta de la nariz del cono, el buje, el eje principal y tres palas, (2) el generador y (3) la góndola, integrada por una carcasa que cubre la caja de cambios y el transformador. La energía eólica mueve las tres palas, fabricadas principalmente de fibra de vidrio y resina epoxica, unidas al rotor por medio de un buje y la energía se transmite a través del eje principal hacia la caja de cambios, puesto que para que exista una conversión de energía se necesita una velocidad de entrada y salida específica, dependiendo el tipo y tamaño del generador, por otra parte el transformador se encarga de adaptar la salida del generador a las características de la red (Lenzen y Munksgaard, 2002; Berrios et al., 2009; Vargas et al., 2015; Pliego et al., 2016; Loza et al., 2019). Lo anterior se muestra en la Figura 14.



**Figura 14:** Características físicas de un aerogenerador offshore (adaptado de Dones et al., 2007; Vargas et al., 2015).

Se plantea, para este trabajo, una turbina con potencia nominal de 2 MW, al tratarse de la más común (Dones et al., 2007; Breton y Moe, 2009; Tomporowski et al., 2012; Huang et al., 2017; Haapala y Prempreeda, 2014) y de la potencia con la que se diseñó una turbina eólica que se ha estudiado anteriormente en el contexto mexicano (Vargas et al., 2015), a pesar de que actualmente existan aerogeneradores con mayor capacidad. En la Tabla 12, se muestran las características de diseño que se asumen para la turbina estudiada en el presente trabajo.

**Tabla 8:** Características de diseño para un aerogenerador offshore.

Parámetro	Valor	Fuente
Potencia	2 MW	Dones et al., 2007
		Breton y Moe, 2009
		Tomporowski et al., 2012
		Huang et al., 2017
		Haapala y Prempreeda, 2014
Factor de Capacidad	35%	Haapala y Prempreeda, 2014
Tiempo de vida	20 años	Weinzettel et al., 2009
		Wagner et al., 2011
		Raadal et al., 2014
		Huang et al., 2017
Generación total	122,400,000 kWh	Haapala y Prempreeda, 2014

En este tipo de sistemas se debe considerar el cable submarino para la transmisión de la energía desde el aerogenerador hasta la costa, el cual se coloca sobre el fondo marino, para reducir el riesgo de ser dañado por herramientas de pesca, anclas, etc., debe ser enterrado (Zhixin et al., 2009; Wu et al., 2014; Schreiber et al., 2019). Para este estudio se considera que el cable submarino está compuesto por acero, plástico, plomo y cobre, de acuerdo a lo propuesto por Huang et al. (2017).

El transporte de los equipos que conforman la turbina se supone desde el sitio donde se fabricarán hasta su lugar de instalación, el cual es tanto terrestre como marítimo (Silva, 2020). En la fase de combustibles se prevé los necesarios para las maquinarias que se utilizan en la instalación, según lo propuesto por Huang et al. (2017), con la corrección de que en la base de datos de Ecoinvent no existe un módulo para “Marine oil” por lo que se reemplazó por diesel.

- **Generación**

La generación es quizá la etapa más sencilla (Nugent y Sovacool, 2014), sin embargo, no está exenta de generar efectos ambientales (Dahane et al., 2017), en esta se incluye la operación y mantenimiento del aerogenerador. Algunos de los insumos que se incluyen, como parte del mantenimiento de la turbina, son el aceite y otros recursos necesarios para la lubricación y limpieza de las turbinas (Nugent y Sovacool, 2014; Yang et al., 2018), el mantenimiento se divide en preventivo y correctivo, el cual contempla el reemplazo periódico de componentes dañados o desgastados, así como la mano de obra (Sørensen, 2009; Nugent y Sovacool, 2014; Ji y Chen, 2016).

El mantenimiento, está rodeado de una serie de incertidumbres difíciles de predecir debido a las características de los materiales y la exposición al medio marino, las condiciones meteorológicas y la factibilidad de la turbina (Sørensen, 2009; Martin et al., 2016; Dahane et al., 2017), por la cuál es una de las causas más importantes del alto costo de las turbinas eólicas marinas (Dahane et al., 2017).

En esta etapa, para la fase de mantenimiento este trabajo contempla que el generador, la caja de cambios y las palas del rotor tienen que ser intercambiados una vez durante su vida útil, según lo propuesto por Reimers et al. (2014), así como la cuantificación del lubricante necesario para el correcto funcionamiento de la turbina de acuerdo a lo propuesto por Haapala y Prempreeda (2014).

- **Fin de vida**

El fin de vida, es la etapa final del ciclo de vida de un producto o sistema, consiste en el desmantelamiento del mismo, lo cual involucra el proceso de deconstrucción, posible reciclaje y/o eliminación (Nugent y Sovacool, 2014) de los componentes. En esta etapa, el aerogenerador se desmantelará y la mayoría de sus materiales serán reciclados, como un medio de mitigar la producción de futuras emisiones de GEI (Weinzettel et al., 2009; Nugent y Sovacool, 2014). La Tabla 9 muestra la tasa de reciclaje y/o disposición final de los materiales que integran la estructura tanto de la turbina como del soporte, según lo reportado por diferentes referencias.

**Tabla 9:** Escenarios de fin de vida para los materiales que componen un aerogenerador offshore.

Material	Escenarios de Disposición Final	Referencia
Hierro	90% reciclaje 10% relleno sanitario	(Cortés, 2019) (Chipindula et al., 2018) (Yang et al., 2018) (Huang et al., 2017) (Raadal et al., 2014) (Berrios et al., 2009)
Cables	66% reciclaje 34% recuperación de energía	(Raadal et al., 2014)

**Tabla 9:** Escenarios de fin de vida para los materiales que componen un aerogenerador offshore (Continuación).

Material	Escenarios de Disposición Final	Referencia
Hierro	90% reciclaje 10% relleno sanitario	(Cortés, 2019) (Chipindula et al., 2018) (Yang et al., 2018) (Huang et al., 2017) (Raadal et al., 2014) (Berrios et al., 2009)
Acero	90% reciclaje 10% relleno sanitario	(Cortés, 2019) (Chipindula et al., 2018) (Yang et al., 2018) (Huang et al., 2017) (Raadal et al., 2014) (Berrios et al., 2009)
Cobre*	90% reciclaje 10% relleno sanitario	(Chipindula et al., 2018) (Raadal et al., 2014) (Weinzettel et al., 2009)
	95% reciclaje 5% relleno sanitario	(Cortés, 2019) (Yang et al., 2018)
Fibra de vidrio	100% relleno sanitario	(Cortés, 2019) (Chipindula et al., 2018) (Huang et al., 2017) (Berrios et al., 2009)
	100% Incineración	(Guezuraga et al., 2012)
Concreto demolido	100% relleno sanitario	(Chipindula et al., 2018) (Huang et al., 2017) (Berrios et al., 2009)
	85% reciclaje 15% relleno sanitario	(Raadal et al., 2014)
Otros materiales	100% relleno sanitario	(Huang et al., 2017)

\* Excluyendo el que se utiliza en el cable submarino

La etapa de fin de vida para este trabajo incluye el reciclaje de metales (acero, hierro y cobre) a una tasa del 90%, al igual que los cables al 66%. El resto de los metales son llevados a un relleno sanitario, al igual que los cables, debido a que en México no existe incineración de residuos, exceptuando los biológico infecciosos. Por otro lado, la separación de la resina epoxica y la fibra de vidrio que constituyen las palas del rotor es un problema técnico (Lenzen y Munksgaard, 2002), por lo que su disposición final se hace de manera conjunta en un relleno sanitario. La siguiente tabla (Tabla 10), resume los escenarios de disposición final asumidos en este trabajo.

**Tabla 10:** Escenarios de disposición final asumidos para el aerogenerador offshore.

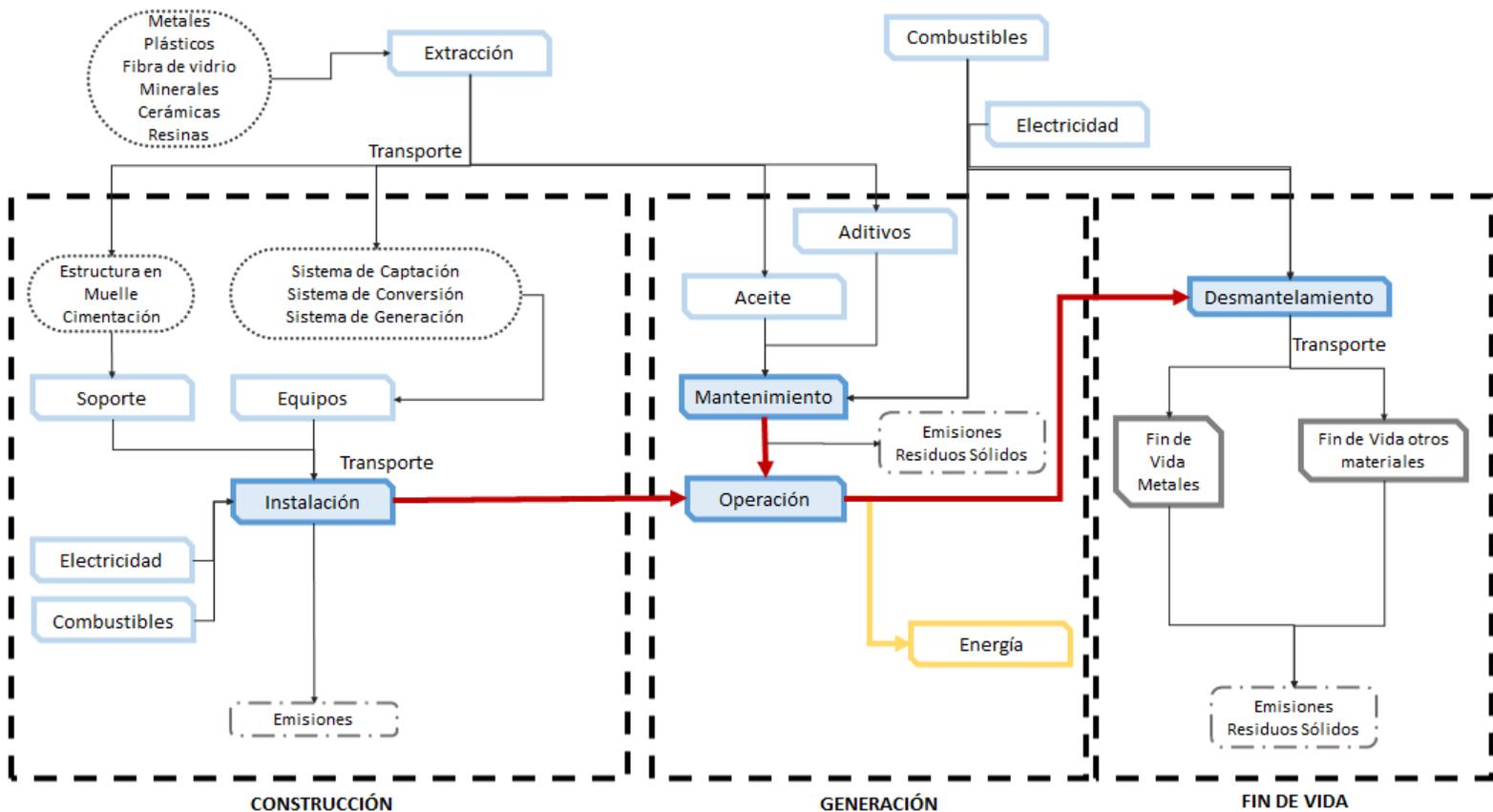
Escenario de disposición final	Material	Cantidad	Unidad
Reciclaje	Acero	90	Porcentaje
	Hierro		
	Cobre		
	Cables	66	

**Tabla 10:** Escenarios de disposición final asumidos para el aerogenerador offshore (Continuación).

Escenario de disposición final	Material	Cantidad	Unidad
Relleno Sanitario	Acero	10	Porcentaje
	Hierro		
	Cobre		
	Concreto	100	
	Caucho		
	Fibra de vidrio		
	Resina Epoxica	34	
Cables			

### 3.1.3.2. BOYA CON BRAZO

Respecto a los sistemas de energía undimotriz, es importante tomar en cuenta las diferentes etapas del ciclo de vida, las cuales se han identificado como: construcción, generación y fin de vida, donde cada una de ellas presenta una serie de sub-etapas, esquematizadas en la Figura 15, para el dispositivo de extracción de energía undimotriz del tipo absorbedor puntual, denominado a partir de ahora como boya con brazo.



**Figura 15:** Esquema de ciclo de vida de una boya con brazo.

A continuación, se detallarán las etapas y sub-etapas mostradas en la Figura 15, la boya con brazo.

- **Construcción**

En esta etapa de construcción se abarca: (i) la extracción de materias primas como lo son minerales y resinas, (ii) la transformación de las materias primas en materiales como acero, hierro, cobre, cemento, entre otros, necesarios para la construcción de los distintos equipos, componentes y estructuras de soporte que integran la boya con brazo. De igual forma se incluye la (iii) manufactura de los equipos, los cuales son todos los componentes que integran los sistemas de captación, conversión y generación. Por otro lado, la sub-etapa de instalación se refiere al montaje del dispositivo sobre el sitio donde quedara fijo para cumplir con su objetivo de la extracción de energía oceánica, se trata de un proceso complejo que incluye los combustibles y la energía requerida por las máquinas para llevar a cabo esta tarea (Dalton et al., 2014; Patrizi et al., 2019).

Este sistema de captación de energía undimotriz está conformado por la estructura del muelle y la cimentación del dispositivo que integran la etapa de obra civil o soporte del dispositivo. Por otra parte, se tiene un brazo, cuyo extremo dirigido a la costa se encuentra unido a la estructura de soporte, mientras que del otro extremo tiene acoplado una boya semiesférica, la cual captura la energía del movimiento de las olas y lo transmite por medio del brazo mecánico hacia el sistema de conversión de la energía (Pelissero et al., 2011; García, 2019). En este sistema, la boya copia el movimiento de las olas, describiendo un movimiento vertical que dependerá de la altura de la ola y su velocidad del período y altura de la misma (Valdez et al., 2015).

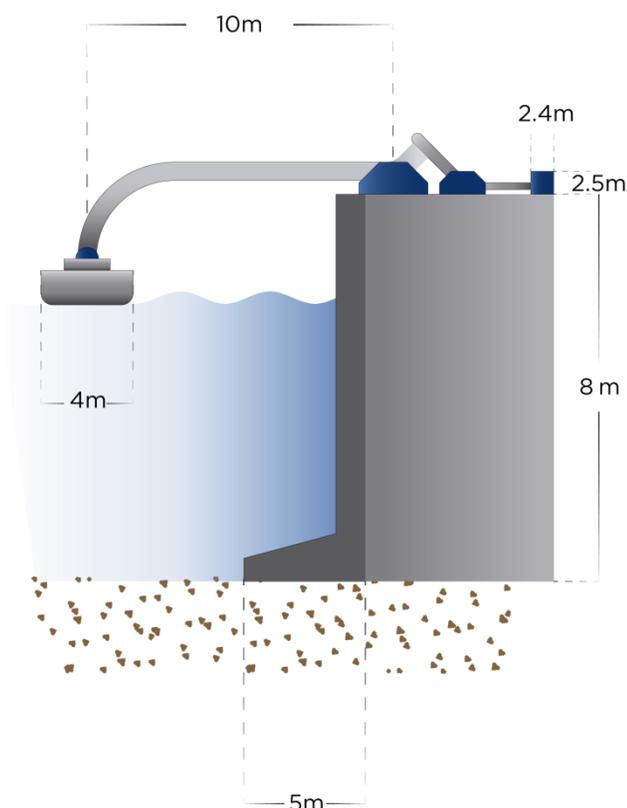
El sistema de conversión está conformado por un pistón hidráulico ubicado en la parte superior del brazo junto al muelle. A su vez, dicho pistón se encuentra unido a un contenedor dentro del cual, por medio de un circuito cerrado, un fluido se ira bombeando hacia un tanque donde se acumulará a alta presión para su liberación sobre una turbina la cual, por medio de un generador producirá la energía eléctrica deseada (Estefen et al., 2010; Pelissero et al., 2014; Valdez et al., 2015; García, 2019). Dentro del mismo sistema de generación, también se encuentra una cámara hiperbárica, la cual funciona como un sistema de almacenamiento de energía, que suaviza las fluctuaciones de potencia debidas a la naturaleza oscilatoria de las olas del mar (Shadman et al., 2019).

El caso de estudio del presente trabajo contempla para el sistema de generación aceite como fluido de trabajo, un sistema de válvulas, así como tuberías y mangueras de diversos diámetros que permiten que dicho fluido circule dentro del sistema de manera que pueda ser bombeado hacia un motor hidráulico donde en su interior el aceite obliga a girar las partes móviles del motor (engranes) produciendo un movimiento rotatorio, este movimiento mecánico se transmite sobre el eje de un generador tipo sincrónico y de esta forma se genere la electricidad (Bonher S.A. de C.V., 2014).

El dispositivo se tiene planeado instalar en el Muelle 1 del Puerto de El Sauzal, Baja California (CFE, 2014; García, 2019), por lo que el transporte de los equipos que conforman el dispositivo se supone desde su sitio de fabricación, en la ciudad de Querétaro hasta el punto de instalación, según lo dicho por el Dr. Silva (2020). En la Figura 16, se puede ver las características físicas del dispositivo de generación de energía undimotriz tipo absorbedor puntual “boya con brazo” (Pinto, 2017; García, 2019), mientras que, en la Tabla 11 se resumen los parámetros de diseño.

**Tabla 11:** Características de diseño para dispositivo undimotriz tipo absorbedor puntual “boya con brazo.”

Parámetro	Valor	Fuente
Potencia	200 kW	Bonher S.A. de C.V., 2014
Tiempo de vida	20 años	Parker et al., 2007
		Thomson et al., 2011
		Uihlein, 2016
		Zhai et al., 2018
		Thomson et al., 2019
Generación Total	8,760,000 kWh	Pinto, 2017



**Figura 16:** Características físicas de un sistema undimotriz tipo boya con brazo (adaptado de Pinto, 2017; García et al., 2019).

- **Generación**

En esta etapa se incluye la operación y mantenimiento del dispositivo (Dahlsten, 2009; Walker y Howell, 2011; Karan et al., 2019). El mantenimiento se refiere a todas las actividades que intervienen en el funcionamiento del dispositivo y las cuales se requieren realizar de manera regular para asegurar una correcta operación durante la vida útil (Dalton et al., 2014). En esta sub-etapa, no se tienen datos reportados para dispositivos de extracción de energía de las olas (Thomson et al., 2011), por lo que se hacen suposiciones basadas en literatura, por ejemplo, que la estructura de soporte de la boya con brazo no requiere reparaciones o sustituciones importantes al tratarse de una obra civil pre-existente (muelle), según lo sugerido por Zhai et al., 2018 para el caso de un WEC localizado dentro de una escollera.

Se consideran, en la etapa de mantenimiento, el aceite y los aditivos necesarios para la generación de energía y correcto funcionamiento de la boya con brazo, según lo propuesto por Pinto (2017). El aceite utilizado en el sistema de generación es sustituido, por el aditivo HIDRALUB 900, en 10% el total del volumen de aceite utilizado, con la finalidad reducir la fricción, desgaste y sobrecalentamiento de manera que se logró mejorar el funcionamiento del sistema (Newlife MOTORS, 2013). El mantenimiento correctivo solo debe llevar a cabo en caso de que agua de mar, o cualquier otro contaminante, se permeara sobre el circuito cerrado donde el aceite es transportado (Bonher S.A. de C.V., 2014).

La operación se refiere a la generación de energía eléctrica por el movimiento de las olas a través del dispositivo undimotriz, electricidad que se cataloga como “energía limpia”, ya que durante esta sub-etapa no hay producción de residuos, emisiones o efluentes (Pelissero et al., 2011).

- **Fin de Vida**

Esta etapa, incluye el desmantelamiento de los dispositivos, que es esencialmente lo contrario al proceso de instalación lo que implica el desprendimiento de la tecnología desde sus cimientos, así como su posible reciclaje y/o eliminación de los diferentes materiales que constituyen la tecnología estudiada en un sitio de disposición final (Dahlsten, 2009; Walker y Howell, 2011; Dalton et al., 2014; Zhai et al., 2018; Karan et al., 2019).

El reciclado de componentes puede tener un efecto significativo en el impacto ambiental de los dispositivos (Thomson et al., 2011; Dalton et al., 2014). Sin embargo, para estudios de sistemas de generación de energía a través del oleaje no hay publicado ninguna practica de eliminación o reciclado (Zhai et al., 2018), por lo que los resultados de esta etapa tienen la incertidumbre asociada las suposiciones que se hagan respecto a las tasas de reciclado.

Para el presente estudio, la tasa de reciclaje se asumió para los elementos metálicos que componen el WEC tipo boya fue del 90%, la cual es la asumida típica para tecnologías de generación de energía renovable (Karan et al., 2019) y la propuesta para otros dispositivos de undimotrices (Parker et al., 2007; Dalton et al., 2014; Douziech et al., 2016; Zhai et al., 2018; Thomson et al., 2019), mientras que el resto de los metales y distintos materiales utilizados en las diferentes etapas del ciclo de vida del dispositivo serán depositados en un relleno sanitario.

### 3.1.3.3. MUTRIKU

Para el sistema de extracción de energía de las olas mediante una tecnología del tipo Columna Oscilante de Agua (OWC), los datos utilizados para integrar el Inventario de Ciclo de Vida proceden de la Central de Energía Undimotriz localizada en Mutriku, España.

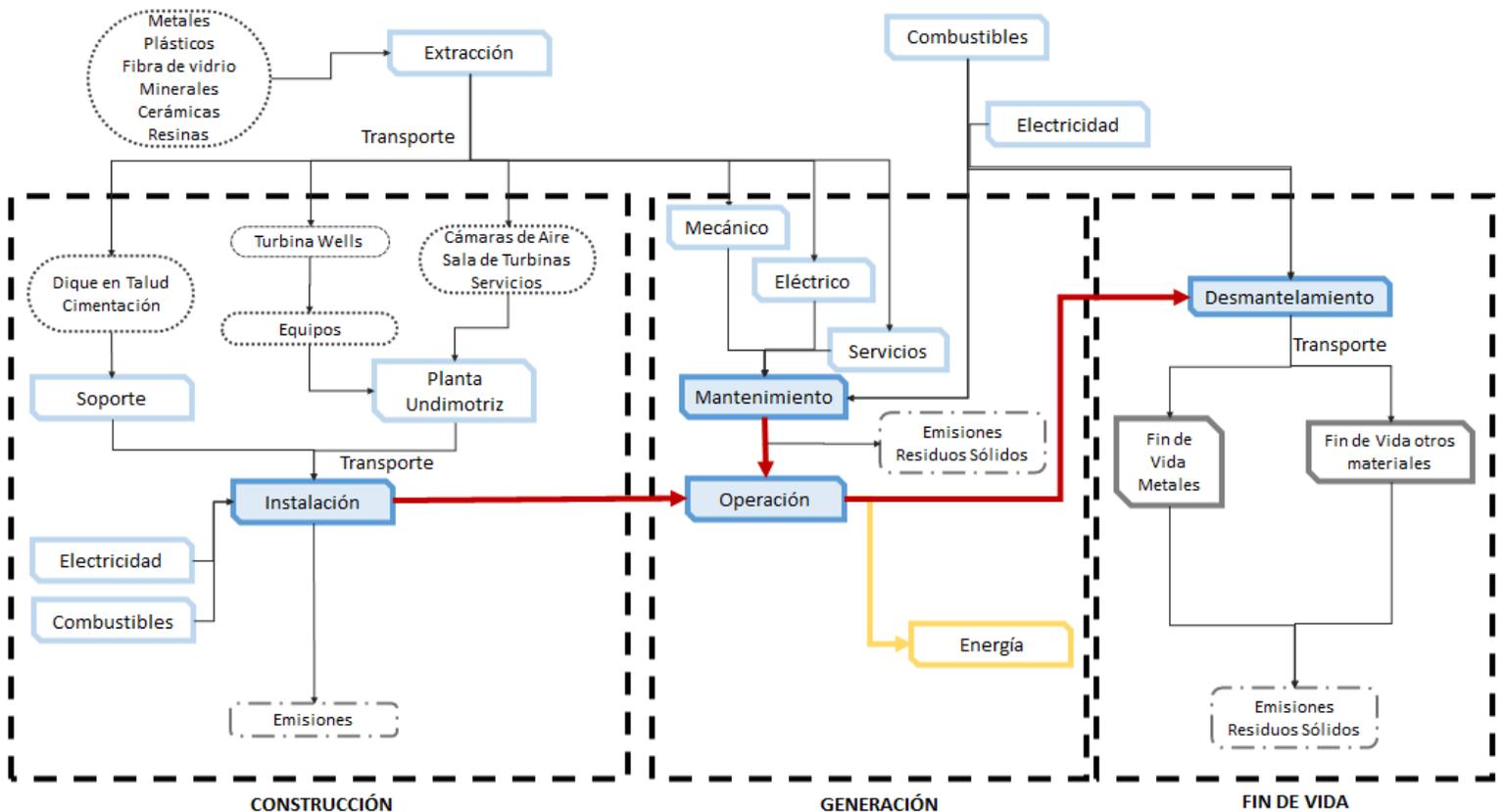
El puerto de Mutriku, uno de los primeros documentados del País Vasco, se encuentra dentro de una pequeña bahía natural del Golfo de Vizcaya en la costa norte de España (Torre-Enciso et al., 2009; Fay et al., 2020). Dentro de este puerto, el Ente Vasco de la Energía (EVE) ha instalado una central eléctrica basada en el aprovechamiento de las olas, como se puede observar en la Figura 17, esta es una de las pocas centrales undimotrices, y la primera de su clase puesto que se conecta a la red local de suministro eléctrico (Garrido et al., 2015; Lekube et al., 2018) y provee energía eléctrica de forma continua a escala comercial (Ibarra et al., 2018; Serras et al., 2019).



**Figura 17:** Planta Undimotriz en Mutriku. España (Otaola et al., 2019).

Dicha central se puso en marcha en Julio del 2011 y utiliza tecnología del tipo Columna Oscilante de Agua (OWC) para la extracción de la energía a partir del océano (Torre-Enciso et al., 2009; Garrido et al., 2015; Ibarra et al., 2018; Lekube et al., 2018; Serras et al., 2019; Faÿ et al., 2020).

Las etapas de ciclo de vida que se contemplan en este estudio para la Planta de Extracción de Energía Undimotriz de Mutriku, se presentan en la Figura 18.

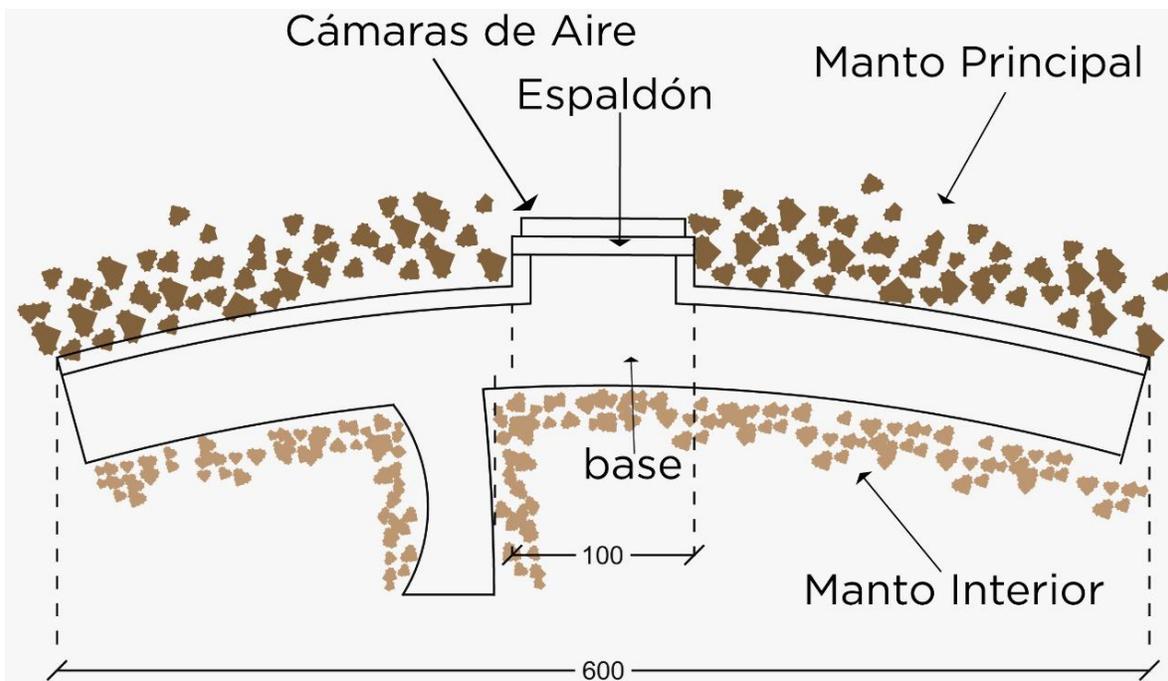


**Figura 18:** Esquema de ciclo de vida de la Planta Undimotriz de Mutriku, España.

A continuación, se detallarán las etapas y sub-etapas mostradas en la Figura 18, que componen el ciclo de vida de Mutriku.

- **Construcción**

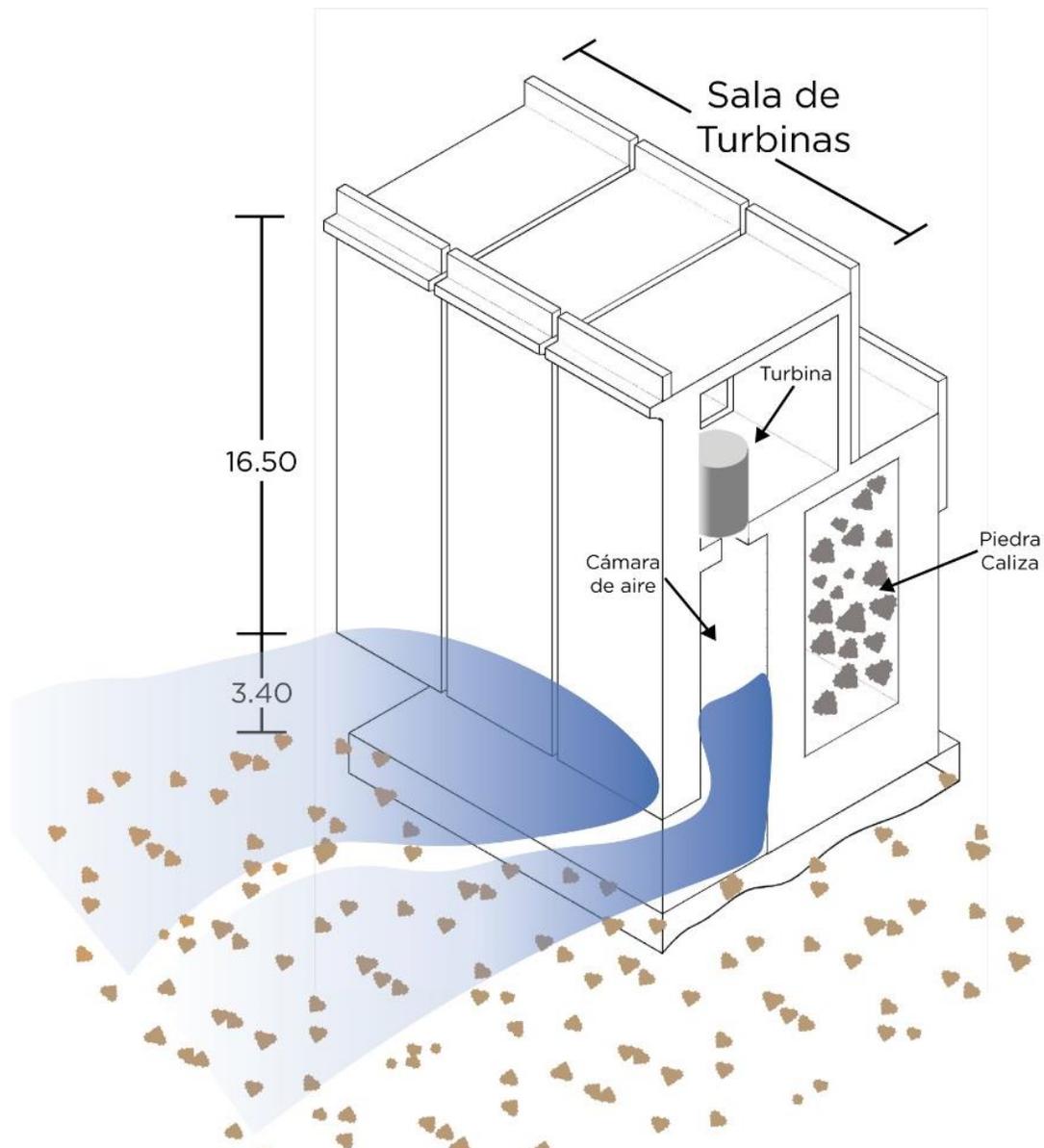
La planta undimotriz está integrada sobre un dique de abrigo de tipo talud. En la Figura 19 (imagen en planta), se muestra la plataforma creada para funcionar como rompeolas y central eléctrica tiene forma de media luna, con una longitud total de 600 metros, de los cuales 100 metros son propiamente de la zona activa donde se encuentran las cámaras de aire, a través de las cuales por medio del aprovechamiento de columnas de agua se obtiene la energía undimotriz (Tease et al., 2007). Dicha plataforma está integrada sobre un dique de abrigo tipo talud (Tease et al., 2007; Torre-Enciso et al., 2009; Aracelay, 2020).



**Figura 19:** Vista en planta de la Central de Energía Undimotriz de Mutriku, España (adaptado de Torre-Enciso et al., 2009; Aracelay, 2020).

El núcleo del dique de abrigo es cantera, mientras que el espaldón de concreto y los mantos, tanto exterior como interior, de bloques de piedra caliza (Torre-Enciso et al., 2009; Aracelay, 2020). La planta undimotriz está formada por bloques prefabricados en forma de trapezoidales de concreto que se superponen y se rellenan de concreto. La pared vertical exterior del parapeto coincide con la base del espaldón del dique de modo que no se aumenta la superficie marina ocupada por el mismo (Aracelay, 2020).

La planta undimotriz de Mutriku está compuesta por 16 cámaras de aire conectadas a través de una abertura superior a una sala de máquinas donde se alojan turbinas tipo Wells, cada una conectada a un turbogenerador con una potencia nominal de 18.5 kW. Dichas cámaras de aire, tienen todas las mismas dimensiones, tal como se muestra en la Figura 20, pues como se menciona anteriormente están construidas con bloques prefabricados, cada una tiene apertura a 3.4 metros por debajo del nivel del mar por medio de la cual es que se puede llevar a cabo la extracción de la energía undimotriz bajo el sistema de OWC (Tease et al., 2007; Torre-Enciso et al., 2009; Torre-Enciso et al., 2010; Garrido et al., 2015; Lekube et al., 2018; Otaola et al., 2019; Aracelay, 2020; Faÿ et al., 2020).



**Figura 20:** Características físicas de la Planta de Energía Undimotriz Mutriku, España (adaptado de Torre-Enciso et al., 2009; Aracelay, 2020).

Un convertidor de energía tipo OWC, como ya se mencionó anteriormente, es básicamente un dispositivo que transforma la energía mecánica de las olas en energía eléctrica. En la planta de energía de Mutriku esto se lleva a cabo con las turbinas tipo Wells, las cuales están ubicadas verticalmente. Las olas que llegan al dique se introducen en las aperturas horizontales inferiores y presurizan el interior de la cámara de aire conectada a cada apertura. El aire asciende por la cámara y atraviesa por la turbina Wells en sentido ascendente y posteriormente descendente, de manera que se acciona la turbina la cual conectada al turbogenerador produce la energía eléctrica a una tensión de 460V y 3000 rpm (Garrido et al., 2015; Lekube et al., 2018; Aracelay, 2020; Faý et al., 2020).

Las turbinas Wells utilizadas en Mutriku, son turbinas relativamente pequeñas, además se trata de dispositivos robustos y sencillos lo que facilita tanto su montaje como su desmontaje, puesto que tienen una altura de 2.83 metros y 1.25 metros de ancho, además cada una incluye dos rotores de cinco palas (Torre-Enciso et al., 2009; Torre-Enciso et al., 2010; Ibarra et al., 2018). Cada rotor está

formado por un número de palas simétricas, lo que significa que siempre giran en la misma dirección independientemente del flujo de aire a través de la turbina, por lo que no se necesita ningún tipo de dispositivo para rectificar dicho flujo (Torre-Enciso et al., 2009; Otaola et al., 2019).

Por otra parte, el esquema eléctrico de la central está dividido para efectos de control en dos grupos, cada uno con 8 turbinas. (Torre-Enciso et al., 2009). El generador tiene una tensión de 460V, la energía se genera en corriente alterna que posteriormente debe rectificarse a corriente directa. La planta undimotriz de Mutriku es capaz de abastecer sus propias necesidades eléctricas para posteriormente, la energía sobrante introducirse a la red de distribución local con una potencia de salida de 13.5 kV (Torre-Enciso et al., 2019; Ibarra et al., 2018; Lekube et al., 2018).

La Tabla 12, muestra las características principales de la planta de energía undimotriz de Mutriku. Es importante resaltar que esta se diseñó con una capacidad de 296 kW (Aracelay, 2020), lo que, si correspondiera a la “generación de diseño” durante la vida útil de la central, tal como que se muestra en la Tabla 12. Sin embargo, la primera y la última cámara están deshabilitadas por lo que la potencia desciende a 260 kW (Faÿ et al., 2020; Fernández, 2017).

**Tabla 12:** Características de diseño para la Planta de Energía Undimotriz en Mutriku, España.

Parámetro	Valor	Fuente
Potencia	296 kW	Tease et al., 2007
		Torre-Enciso et al., 2009
		Torre-Enciso et al., 2010
Tiempo de vida	20 años	Lekube, 2021
Generación de Diseño	12,000,000 kWh	Torre-Enciso et al., 2009
		Torre-Enciso et al., 2010
Generación Real	4,929,377 kWh	Ibarra et al., 2018
		Serras et al., 2019

Además, debido a la irregularidad del fondo marino y la configuración espacial del rompeolas, así como a las actividades de mantenimiento de la planta, que se detallarán dentro de la etapa de generación, el número de turbinas activas no es siempre el mismo, pero se estima que en promedio son 10 turbinas las que funcionan constantemente, ocasionando una merma en la capacidad de la central de hasta el 62% de lo planteado inicialmente (Fernández, 2017; Ibarra et al., 2018; Serras et al., 2019) y es debido a ello que en la Tabla 12 se observa que la generación real es mucho menor a la generación para la cual se diseñó la central undimotriz de Mutriku. Para este estudio, se utilizó la generación real.

- **Generación**

Como se ha mencionado anteriormente, esta es quizá la etapa más sencilla (Nugent y Sovacool, 2014), pero ello no significa que está exenta de generar efectos ambientales (Dahane et al., 2017), aquí se incluye la operación y mantenimiento de la Planta Undimotriz (Dahlsten, 2009; Walker y Howell, 2011; Karan et al., 2019).

El mantenimiento se refiere a todas las actividades que intervienen para asegurar el correcto funcionamiento de la planta y las cuales se requieren realizar de manera regular para asegurar una correcta operación durante la vida útil (Dalton et al., 2014). Dichas actividades de mantenimiento se realizan principalmente debido a las condiciones adversas a las que la central de energía de las olas de Mutriku, donde muchos de los componentes que la integran están expuestos a altos niveles de humedad y a un entorno salino, lo que produce fatiga en los materiales repercutiendo en el

rendimiento de los dispositivos y que consecuentemente conduce a fallos en los equipos y en el rendimiento de la producción de energía (Lekube et al., 2018).

El mantenimiento de la central undimotriz se realiza anualmente tanto preventiva como correctivamente; se realizan revisiones mensuales y en función del grado de desgaste de cada componente es que se interviene. Durante estas actividades se abarcan tanto los componentes mecánicos como los eléctricos (Lekube et al., 2018; Lekube, 2021).

Se consideran, en la etapa de mantenimiento para este trabajo la limpieza de las turbinas, el sistema eléctrico y el sistema mecánico. Para la limpieza de las turbinas, así como para cubrir los servicios sanitarios de la planta, se utiliza agua dulce la cual es obtenida de la red de abastecimiento local esto debido a que es necesario limpiar los rodets de la turbina ya que el aire que circula a través de estas contiene sal y esta se queda pegada en los álabes provocando una pérdida aerodinámica y desequilibrios en el eje de la turbina (Lekube et al., 2018; Lekube, 2021).

El mantenimiento del sistema eléctrico consiste en revisiones trimestrales de los dispositivos electrónicos, donde anualmente se cambian aproximadamente 5 ventiladores (Lekube, 2021). Por otra parte, el sistema mecánico requiere más actuaciones, puesto que las actividades de mantenimiento a este se realizan cada mes debido a que se deben asegurar que los niveles de engrase de los rodamientos sean adecuados, así como el cambio de dichos rodamientos, los cuales se cambian entre 8 y 10 al año. De igual forma los rodets de la turbina deben cambiarse, anualmente se reponen entre 5 o 6 de dichas piezas (Lekube, 2021).

Es importante señalar que el mantenimiento del dique recae en la Dirección de Puertos, por lo que no es competencia de la planta undimotriz (Lekube, 2021) y es por ello que no se incluye en este estudio.

Durante la operación, al no requerir insumos u otras materias primas más que el movimiento de las olas para mover las turbinas y que estas generen la energía es que en esta sub-etapa no hay producción de residuos, emisiones o efluentes.

- **Fin de Vida**

Para la etapa de fin de vida se incluye el desmantelamiento de la planta undimotriz desde sus cimientos, así como su posible reciclaje y/o eliminación de los diferentes materiales que constituyen la tecnología estudiada en un sitio de disposición final, tal como se recomienda para otras tecnologías de generación de energía undimotriz (Dahlsten, 2009; Walker y Howell, 2011; Dalton et al., 2014; Zhai et al., 2018; Karan et al., 2019).

Para el presente estudio, la tasa de reciclaje se asumió para los elementos metálicos que componen el la planta undimotriz es del 90%, la cual es la asumida típica para tecnologías de generación de energía renovable (Karan et al., 2019) y la propuesta para otros dispositivos de undimotrices (Parker et al., 2007; Dalton et al., 2014; Douziech et al., 2016; Zhai et al., 2018; Thomson et al., 2019), mientras que el resto de los metales y distintos materiales utilizados en las diferentes etapas del ciclo de vida del dispositivo se asume que serán depositados en un relleno sanitario.

## 3.2. INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

Esta fase, como ya se mencionó previamente (véase apartado 2.1.3.2), consiste en cuantificar las entradas (materias primas, insumos y energía) y salidas (emisiones, efluentes, residuos sólidos), de cada proceso que compone el ciclo de vida del sistema analizado (ISO, 14040). Se tomaron diferentes criterios para cada una de las tecnologías, los cuales se describen posteriormente, sin embargo, para la etapa de fin de vida se tomaron los siguientes supuestos homogéneamente para todos los dispositivos analizados.

Como ya se ha mencionado, la etapa de fin de vida incluye el desmantelamiento de los dispositivos. Sin embargo, es, hasta la fecha, la etapa como mayor incertidumbre debido a que no hay publicados estudios sobre las prácticas de eliminación o reciclado de los dispositivos de generación de energía oceánica (Zhai et al., 2018), por lo que en la Tabla 13 se muestran las suposiciones en la tasa de reciclaje para todos los materiales utilizados en los distintos dispositivos según lo reportado en la literatura.

**Tabla 13:** Tasa de reciclaje supuesta para cada material utilizado.

Escenario de disposición final	Material	Cantidad	Unidad	Referencia
Reciclaje	Acero	90	Porcentaje	Cortés, 2019
	Hierro			Karan et al., 2019
	Cobre			Thomson et al., 2019
	Aluminio			Chipindula et al., 2018
	Cables			66
Relleno Sanitario	Acero	10		Zhai et al., 2018
	Hierro			Huang et al., 2017
	Cobre			Douziech et al., 2017
	Concreto	100		Dalton et al., 2014
	Caucho			Raadal et al., 2014
	Fibra de vidrio		Berrios et al., 2009	
	Resina Epoxica		Weinzettel et al., 2009	
	Cables		34	Parker et al., 2007

Los elementos utilizados en la etapa de fin de vida son módulos ya presentes en la base de datos de Ecoinvent 3.4, GaBi LCA Database o modelados de acuerdo a lo propuesto por PE: International Sustainability Performance (2014) para el fin de vida.

En el caso de los materiales metálicos, se tiene una alta tasa de reciclaje, del 90%, como se muestra en la Tabla 13. Sin embargo, una vez que termina la vida útil de los dispositivos, los materiales que se utilizaron para la cimentación, acero y concreto, quedan en el océano dado que no es posible su completa remoción.

A la falta de módulos dentro de las bases de datos utilizadas que modelaran el fin de vida de los materiales que permanecen en el océano la cantidad de acero y concreto que se utilizan en la sub-etapa de la construcción de soporte, específicamente para la cimentación se modelaron dentro de los impactos de relleno sanitario y al resto de estos materiales, así como a todos los demás que se utilizaron en cada dispositivo, se les aplicó la tasa de reciclaje propuesta en la literatura. Esta suposición, concuerda con lo propuesto por Rule et al., (2009) para un sistema de aprovechamiento de la energía maremotriz quienes plantean que todo el acero de refuerzo sería eliminado junto con el concreto a una tasa del 100% en relleno sanitario debido a la complejidad que representaría su separación y reciclaje, además un enfoque conservador podría minimizar la incertidumbre acarreada en esta etapa por la falta de datos.

Para los módulos de la etapa de fin de vida, la unidad utilizada son kilogramos de material, por lo que en los casos de concreto y piedra caliza, en los que se tienen m<sup>3</sup> de material, se utilizaron las densidades reportadas por CEMEX Concretos (s.f) y Guerrero, (2001) respectivamente.

### 3.2.1. AEROGENERADOR OFFSHORE

El inventario de ciclo de vida para un aerogenerador offshore, se integró con base en una revisión bibliográfica, estructurando la información de acuerdo a las etapas identificadas como relevantes (construcción, operación y mantenimiento) según lo explicado en el apartado 3.1.3.1.

Se priorizaron los datos de Vargas et al., (2015) para los equipos, componentes y materiales requeridos en la manufactura y ensamble de la turbina eólica, mientras que de Dones et al., (2007) para la estructura de soporte, como se mencionó en el apartado 3.1.3.1, los datos restantes se fueron cubriendo con la literatura priorizando la información de acuerdo al año de publicación, tipo de cimentación y capacidad nominal, con la finalidad de obtener datos recientes y de sistemas lo más parecidos al planteado. Para obtener la cantidad de material requerido por unidad funcional se realizaron los siguientes cálculos, además de la conversión necesaria, en caso de ser requerida, para obtener los datos en kg por unidad funcional.

1. Se obtuvo la generación total una vez que se aplicó el factor de capacidad seleccionado.

$$\frac{GWh}{año} \times \frac{\text{años de vida útil}}{\text{aerogenerador offshore}} \times \frac{kWh}{GWh} = \frac{kWh}{\text{aerogenerador offshore}}$$

2. Se calculó los materiales requeridos por el aerogenerador offshore a lo largo del ciclo de vida por unidad funcional.

$$\frac{\text{cantidad de material}}{\text{aerogenerador offshore}} \times \frac{\text{aerogenerador offshore}}{kWh} = \frac{\text{cantidad de material}}{kWh}$$

### 3.2.2. BOYA CON BRAZO

El inventario de ciclo de vida para un sistema de extracción de energía undimotriz del tipo absorbedor puntual “boya con brazo” se integró con base en la información recolectada por Pinto (2017) y la proporcionada por la empresa Bohher S.A. de C.V. (2014), así como García (2019). La información se estructuró de acuerdo a las etapas identificadas como relevantes (construcción, operación y mantenimiento) según lo explicado en el apartado 3.1.3.2.

Para obtener la cantidad de material requerido por unidad funcional se realizaron los siguientes cálculos, además de la conversión necesaria, en caso de ser requerida, para obtener los datos en kg por unidad funcional.

$$\frac{\text{cantidad de material}}{\text{boya con brazo}} \times \frac{\text{boya con brazo}}{kWh} = \frac{\text{cantidad de material}}{kWh}$$

Para obtener los materiales y pesos de algunos de los componentes que integran el dispositivo se buscaron las fichas técnicas de dichos componentes, en caso de no encontrarlos se excluyeron del estudio puesto que no se tenía la información necesaria.

A continuación, se describen las operaciones realizadas para obtener la cantidad de concreto generado a partir de las cantidades de cemento proporcionadas. Se asumió una resistencia convencional para la estructura del muelle (200 kg/cm<sup>2</sup>) y una resistencia especial para la cimentación (250 kg/cm<sup>2</sup>) según lo recomendado en la literatura (CEMEX Concretos).

$$\frac{\text{cantidad cemento}}{\text{boya con brazo}} \times \frac{\text{m}^3 \text{ concreto}}{\text{kg cemento}^*} \times \frac{\text{boya con brazo}}{\text{kWh}} = \frac{\text{m}^3 \text{ concreto}}{\text{kWh}}$$

La cantidad de cemento que se requiere para la obtención de un metro cúbico de concreto depende de la resistencia con la que se desee construir.

### 3.2.3. MUTRIKU

El inventario de ciclo de vida para la planta de energía undimotriz, localizada en el Puerto de Mutriku, España, se integró con base en una revisión bibliográfica, así como a la información ofrecida de primera mano del Dr. John Lekube (Lekube, 2021), estructurandola de acuerdo a las etapas identificadas como relevantes (construcción, operación y mantenimiento) según lo explicado en el apartado 3.1.3.1.

Para obtener la cantidad de material requerido por unidad funcional se realizaron los siguientes cálculos, además de la conversión necesaria, en caso de ser requerida, para obtener los datos en kg por unidad funcional.

$$\frac{\text{cantidad de material}}{\text{Mutriku}^*} \times \frac{\text{Mutriku}^*}{\text{kWh}} = \frac{\text{cantidad de material}}{\text{kWh}}$$

\*Mutriku, se refiere al total de dispositivos requeridos para que la Planta de Energía Undimotriz, localizada en Mutriku, España, funcione de acuerdo a lo descrito en el apartado 3.1.3.3 de este documento.

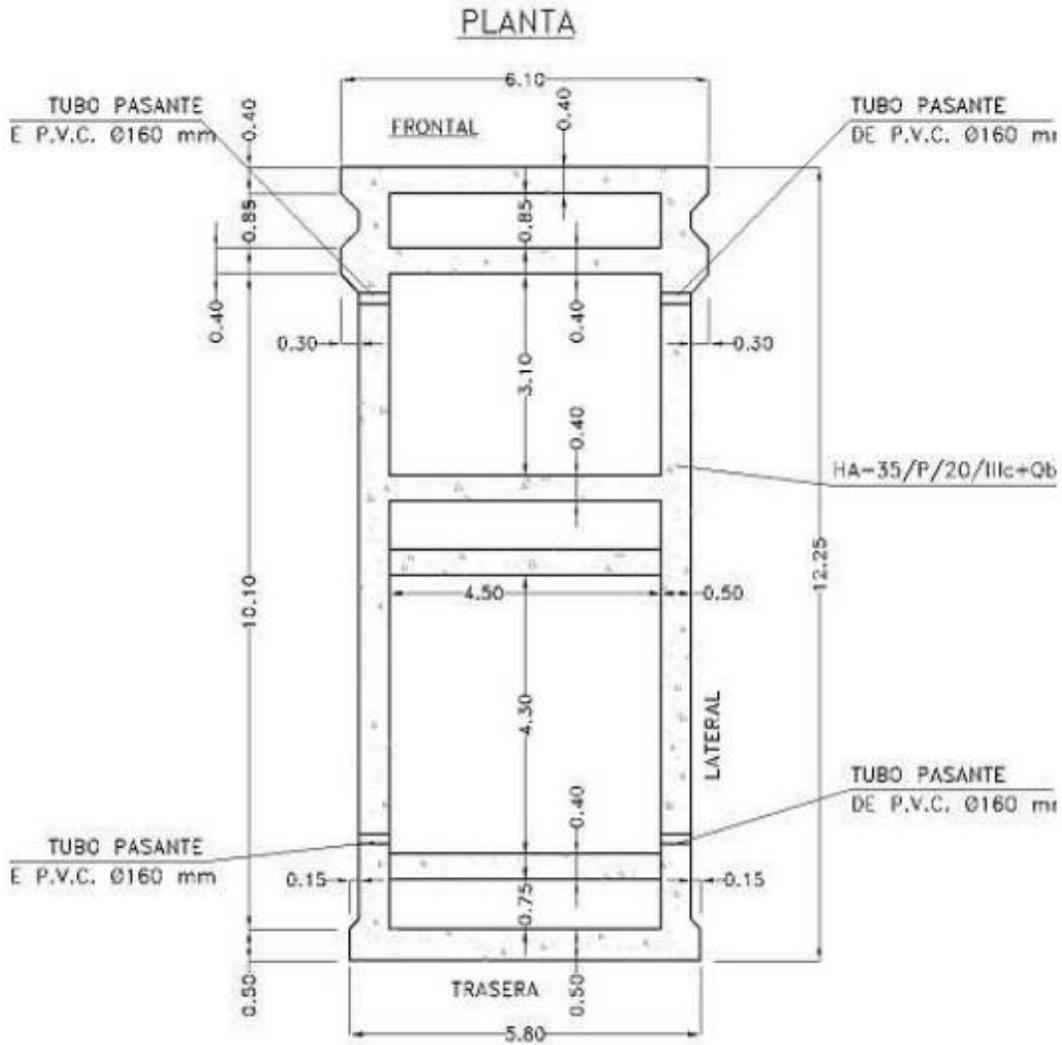
Para obtener los materiales y pesos de algunos de los componentes que integran los dispositivos de Mutriku, se buscaron las fichas técnicas de dichos componentes.

A continuación, se describen las operaciones realizadas para obtener las cantidades de concreto, piedra caliza y acero que se requirieron para la construcción tanto del muelle como de la Planta Undimotriz, según lo descrito por Aracelay (2020) y Torre-Enciso et al., (2009) e interpretado con ayuda del Arquitecto Jonatan León (León, 2021), con el objetivo de tener un aproximado de los materiales utilizados.

En la Figura 21, se muestra el diagrama en planta de los bloques pre-fabricados con los que se construyó la Planta Undimotriz. Se observa que están compuestos de 5 “huecos”, además de que la parte frontal y la trasera son de diferentes medidas, al igual que los largos de izquierda y derecha, esto se hizo para darle la curvatura al muelle. Sin embargo, para facilidad del cálculo se tomo la media entre estas dos medidas tanto para el largo como para el ancho, dando como resultado una placa de 11.75 metros largo por 5.95 metros ancho. El área de este bloque es lo que se denomina “placa plana”, mientras que la “placa pre-fabricada completa” es aquella en la que ya se les restaron las áreas correspondientes a los huecos.

$$\text{Placa Plana} = \text{largo} \times \text{ancho} = 11.75\text{m} \times 5.95\text{m} \approx 70\text{m}^2$$

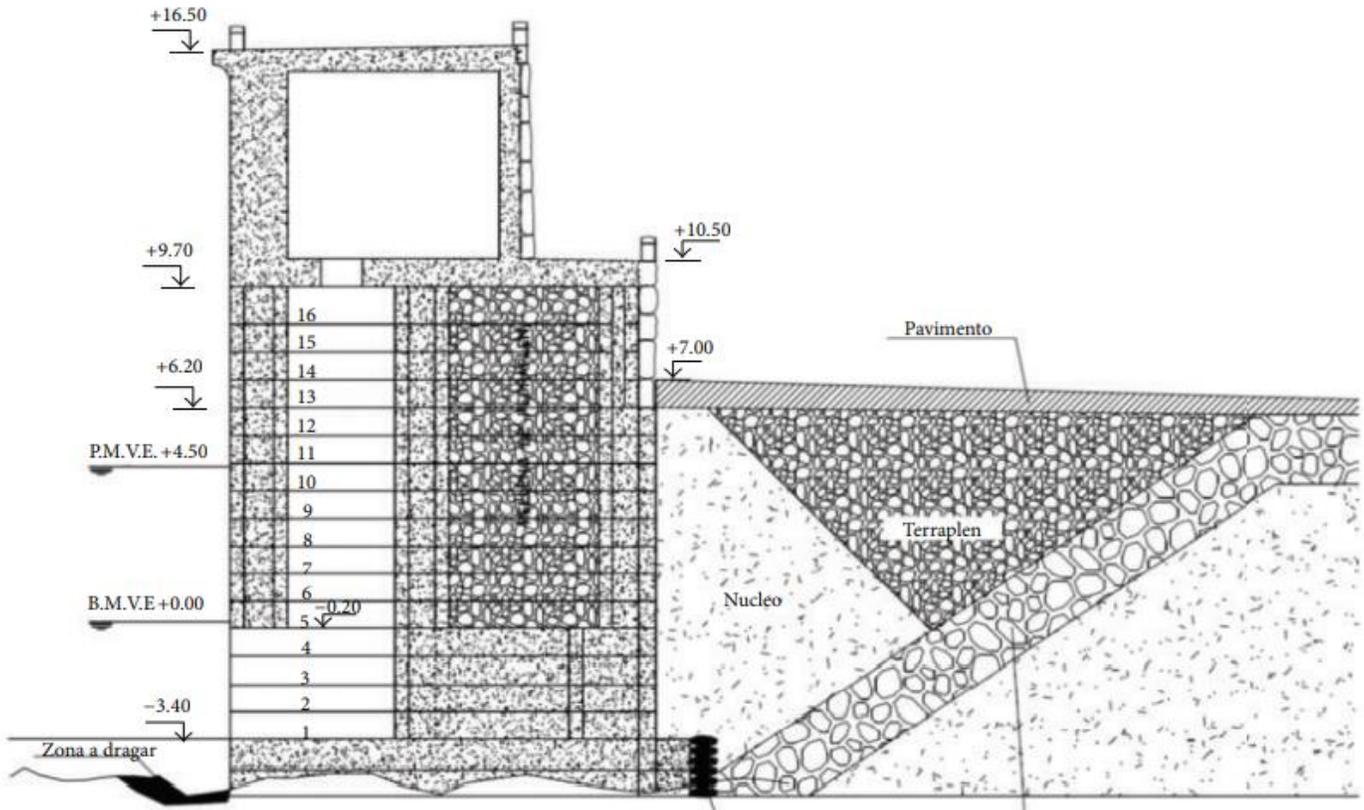
$$\text{Placa Pre – fabricada Completa} = \text{Placa Plana} - \sum \text{área huecos}$$



**Figura 21:** Bloques pre-fabricados (Torre-Enciso et al., 2009).

La cámara de aire, la cual se encuentra sumergida por debajo del nivel del mar, es lo que a continuación se describe como “placa abierta”. Esta placa, esta abierta hasta el hueco 3 solamente de la parte frontal, con una altura de 3.40 metros, mientras que para el resto de los huecos se utilizó concreto para rellenarlos, tal como se muestra en la Figura 22, por esa sección entra la ola, generando un cambio de presión que permite el movimiento de la ola. La cantidad de concreto necesario para esta esta sección, en las 16 cámaras de aire que componene la planta de energía de las olas, se calculó como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 \text{Concreto}_{\text{placa abierta}} &= (\text{Placa Pre - fabricada completa} \\
 &- \sum \text{parte frontal huecos 1 y 2} \\
 &+ \sum \text{área de los huecos 3, 4 y 5})(\text{altura})(\# \text{ cámaras})
 \end{aligned}$$



**Figura 22:** Corte transversal cámara de aire Planta Undimotriz Mutriku, España (Garrido et al., 2015).

La “placa completa” es tal como se muestra en la Figura 22, se refiere a aquellas secciones que van de la placa 5 hasta la 16. Esta sección está rellena de piedra caliza, según lo reportado por Torre-Enciso et al., (2009), por lo que a continuación se describen las ecuaciones con las que se calcularon tanto el concreto como la piedra caliza necesaria para las 16 cámaras de aire que conforman Mutriku.

$$\text{Concreto}_{\text{placa completa}} = \text{área hueco 4} \times \text{altura} \times \# \text{ cámaras}$$

$$\text{Piedra Caliza}_{\text{placa completa}} = \sum \text{área huecos 1, 3 y 5} \times \text{altura} \times \# \text{ cámaras}$$

La “Sala de Turbinas” y la “Pavimentación” son la parte superior de la cámara de aire, donde se encuentran propiamente las Turbinas tipo Wells y la explanada que abarca toda la parte posterior a la planta undimotriz. La “Sala de Turbinas” está compuesta por las paredes, el suelo y la losa. A continuación, se muestran las ecuaciones con las que se hicieron los cálculos para obtener las cantidades aproximadas de concreto que se requerían.

El suelo de la turbina es una placa de cemento, se supuso que eran las denominadas “placa plana”, con un agujero circular con un diámetro de 0.75 metros (Torre-Enciso et al., 2009) y un grosor de 0.80 cm.

$$\text{Sala de Turbinas}_{\text{suelo}} = (\text{Placa Plana} - \pi r^2)(\text{grosor})(\# \text{ cámaras})$$

Para calcular la cantidad de concreto para las paredes se dividió las paredes traseras (pared 1), paredes frontales (pared 2) y las transversales. Ya que tiene diferentes medidas de ancho, según lo reportado por Torre-Enciso et al., 2009.

$$Sala\ de\ Turbinas_{pared\ 1} = (ancho)(altura)(largo)$$

$$Sala\ de\ Turbinas_{pared\ 2} = (ancho)(altura)(largo)$$

$$Sala\ de\ Turbinas_{pared\ 3} = (ancho)(altura)(largo)$$

Para la pared 3, se asumió que el largo es del mismo que las placas pre-fabricadas originales, así como los anchos de los muros, como se muestran en la Figura 21. La cantidad total de concreto es la suma de las cantidades parciales por pared, tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$$Sala\ de\ Turbinas = \sum Paredes\ Sala\ de\ Turbinas$$

La “Pavimentación” se calculó utilizando la extensión reportada por Torre-Enciso et al., (2009), de la explanada por el grosor de la plancha de cemento que se asumió igual que la de la “Sala de Turbinas”.

### 3.3. EVALUACIÓN DE IMPACTO

Para este trabajo se utilizó la metodología ReCiPe v1.08 a punto medio, pues de acuerdo con Antón Vallejo (2004) “se hayan más cercanas a la intervención ambiental, permitiendo generar modelos de cálculo que se ajusten mejor a esa intervención”, así mismo se trata de la metodología más común para la evaluación de impactos de ciclo de vida (Apolonia y Simas, 2021). Además, utilizando esta versión de ReCiPe se tendría concordancia con los estudios de ACV de energías del océano previamente presentados por el grupo de investigación en análisis de ciclo de vida del proyecto CEMIE-Océano.

La modelación de los sistemas se realizó con el software especializado GaBi Thinkstep. Se utilizó la base de datos de Ecoinvent 3.4, así como la propia del software utilizado, especialmente en la etapa de fin de vida donde en los módulos de esta última base de datos se distinguen por las letras “ts” al final de cada uno. En el caso de los escenarios de reciclaje para los materiales ferrosos: cobre, aluminio y hierro en su etapa de fin de vida no existe en ninguna de las dos bases de datos módulos establecidos por lo que se diseñaron según lo descrito por PE International en el 2014 (PE International, 2014) y en el inventario se denominan como “valorización”.

#### 3.3.1. SELECCIÓN DE CATEGORÍAS DE IMPACTO

La generación de energía a través del océano ha sido evaluada principalmente desde el uso de energía y las emisiones de dióxido de carbono, excluyendo otras categorías de impacto ambiental (Uihlein, 2016; Paredes et al., 2019; Pennoch et al., 2021).

Sin embargo, el crecimiento de los sistemas de energía oceánica tanto a nivel de investigación como desarrollo tecnológico, exigen más información sobre los impactos ambientales. Por lo anterior, Paredes et al., (2019) proponen como relevantes para este tipo de estudios las siguientes categorías: cambio climático, agotamiento de los combustibles fósiles, toxicidad humana, eco-toxicidad y eutrofización marina, agotamiento de los recursos minerales, agotamiento de la capa de ozono,

formación de material particulado y acidificación y son las que se analizarán en este trabajo. Dichas categorías de impacto evaluadas en este trabajo se muestran con sus siglas y unidades en la Tabla 14.

**Tabla 14:** Categorías de impacto seleccionadas.

Siglas	Categoría	Unidad
<b>CC</b>	Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> equivalente
<b>AO</b>	Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 equivalente
<b>AT</b>	Acidificación terrestre	kg SO <sub>2</sub> equivalente
<b>EM</b>	Eutrofización marina	kg N equivalente
<b>TH</b>	Toxicidad humana	kg 1,4-DCB equivalente
<b>FMP</b>	Formación de material particulado	kg PM <sub>10</sub> equivalente
<b>ETM</b>	Eco-toxicidad marina	kg 1,4-DCB equivalente
<b>AM</b>	Agotamiento de recursos minerales	kg Fe equivalente
<b>ACF</b>	Agotamiento de los combustibles fósiles	kg Petróleo equivalente

Como se mencionó en la Tabla 3 (véase apartado 2.1.3.3), la categoría de impacto de cambio climático está asociada a la emisión de GEI. Las energías renovables están impulsadas principalmente porque se cree son limpias en términos de que no producen dichas emisiones (Esteban et al., 2011; Esteban y Leary, 2012). Por otro lado, la energía marina es de igual forma vista como una opción para reemplazar el agotamiento de los recursos fósiles (Hong y Möller, 2011; Wang y Teah, 2017), razón por la cual evaluar los impactos en dicha categoría resulta valioso.

La categoría de toxicidad humana considera el efecto de una sustancia química sobre la salud del ser humano (Goedkoop et al., 2009), razón por la cual se le considera de suma importancia en la evaluación de impacto de este tipo de tecnologías, además de que se les relaciona directamente con los procesos de extracción de materias primas y transformación en los materiales necesarios para el desarrollo de los distintos dispositivos (Paredes et al., 2019).

Tanto la eco-toxicidad como la eutrofización marina deben ser consideradas entre los impactos, puesto que relacionan la presencia de sustancias tóxicas, materiales o exceso de nutrientes, provenientes de las distintas etapas de construcción, generación y disposición final que integran el ciclo de vida de los dispositivos estudiados con el daño causado sobre los cambios de disponibilidad y distribución de gases y nutrientes e interacciones ecológicas sobre la columna de agua y los ecosistemas marinos (Mendoza et al., 2019).

Respecto a las categorías de impacto de agotamiento de la capa de ozono, agotamiento de los recursos minerales, acidificación y formación de material particulado, se deben incluir en dentro de los ACV que estudian energías del océano, según lo recomendado por Paredes et al., (2019) y Zhang et al., (2020), puesto que se consideran relevantes debido a los altos consumos de minerales y energía, así como los diversos materiales utilizados para construir y operar adecuadamente los distintos dispositivos de generación de energía oceánica.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

Los valores que se muestran en cada uno de los inventarios presentados a continuación, corresponden a los sistemas de generación de energía a través del océano estudiados y están referenciados a la unidad funcional.

### 4.1.1. AEROGENERADOR OFFSHORE

El inventario del ciclo de vida (ICV) de un aerogenerador offshore se presenta a continuación en la Tabla 15, de acuerdo a las etapas de construcción, generación y fin de vida, así como las sub-etapas que integran a cada una de ellas.

**Tabla 15:** ICV Aerogenerador Offshore.

Equipo	Componente	Material	Cantidad <sup>1</sup>	Unidad	Tipo	Total <sup>2</sup>	Unidad	Modulo Ecoinvent 3.4	Referencia
<b>Construcción</b>									
Rotor	Buje	Hierro Fundido	14	ton	Entrada	1.14E-04	kg	GLO: market for cast iron ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
	Palas de rotor	Fibra de vidrio	7.8	ton	Entrada	6.37E-05	kg	GLO: market for glass fibre ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
		Resina Epoxica	11.7	ton	Entrada	9.56E-05	kg	GLO: market for epoxy resin ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
	Eje principal	Acero de baja aleación	12661	kg	Entrada	1.03E-04	kg	GLO: market for steel. low-alloyed ecoinvent 3.4	Dones et al., 2007
	Nariz de cono	Fibra de vidrio	0.124	ton	Entrada	1.01E-06	kg	GLO: market for glass fibre ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
		Resina epoxica	0.186	ton	Entrada	1.52E-06	kg	GLO: market for epoxy resin ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
Góndola	Caja de cambios	Hierro Fundido	9139	kg	Entrada	7.47E-05	kg	GLO: market for cast iron ecoinvent 3.4	Dones et al., 2007
		Acero cromado	9139	kg	Entrada	7.47E-05	kg	GLO: market for metal working. average for chromium steel product manufacturing ecoinvent 3.4	Dones et al., 2007
		Caucho	100	kg	Entrada	8.17E-07	kg	GLO: market for synthetic rubber ecoinvent 3.4	Dones et al., 2007
	Carcasa	Fibra de vidrio	0.8	ton	Entrada	6.54E-06	kg	GLO: market for glass fibre ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
		Resina epoxica	1.2	ton	Entrada	9.80E-06	kg	GLO: market for epoxy resin ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015

<sup>1</sup> La cantidad de material requerido por ese componente o equipo por aerogenerador, según lo reportado por la literatura.

<sup>2</sup> La cantidad total es el valor obtenido con base en la unidad funcional del sistema.

**Tabla 15:** ICV Aerogenerador Offshore (Continuación)

Equipo	Componente	Material	Cantidad <sup>1</sup>	Unidad	Tipo	Total <sup>2</sup>	Unidad	Modulo Ecoinvent 3.4	Referencia
<b>Construcción</b>									
Góndola	Carcasa	Hierro	10.5	ton	Entrada	8.58E-05	kg	GLO: market for cast iron ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
	Transformador	Silica	0.149	ton	Entrada	1.22E-06	kg	GLO: market for silica sand ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
		Cobre	1.5	ton	Entrada	1.23E-05	kg	GLO: market for metal working. average for copper product manufacturing ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
		Acero	3.3	ton	Entrada	2.70E-05	kg	GLO: market for metal working. average for steel product manufacturing ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
Generador	Silica	0.195	ton	Entrada	1.59E-06	kg	GLO: market for silica sand ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015	
	Cobre	2.0	ton	Entrada	1.63E-05	kg	GLO: market for metal working. average for copper product manufacturing ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015	
	Acero	4.29	ton	Entrada	3.50E-05	kg	GLO: market for metal working. average for chromium steel product manufacturing ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015	
Soporte	Torre	Acero de baja aleación	113210	kg	Entrada	9.25E-04	kg	GLO: market for steel. low-alloyed ecoinvent 3.4	Dones et al., 2007

<sup>1</sup> La cantidad de material requerido por ese componente o equipo por aerogenerador, según lo reportado por la literatura.

<sup>2</sup> La cantidad total es el valor obtenido con base en la unidad funcional del sistema.

**Tabla 15:** ICV Vida Aerogenerador Offshore (Continuación)

Equipo	Componente	Material	Cantidad <sup>1</sup>	Unidad	Tipo	Total <sup>2</sup>	Unidad	Modulo Ecoinvent 3.4	Referencia
<b>Construcción</b>									
Soporte	Cimentación	Acero Reforzado	80000	kg	Entrada	6.54E-04	kg	GLO: market for metal working. average for steel product manufacturing ecoinvent 3.4	Dones et al., 2007
		Concreto	873	m <sup>3</sup>	Entrada	7.13E-06	m <sup>3</sup>	CH: market for concrete. normal ecoinvent 3.4	Dones et al., 2007
Cable Sub-marino		Acero	268.58	kg	Entrada	2.19E-06	kg	GLO: market for metal working. average for steel product manufacturing ecoinvent 3.4	Huang et al., 2017
		Plástico	443.44	kg	Entrada	3.62E-06	kg	GLO: market for extrusion. plastic pipes ecoinvent 3.4	Huang et al., 2017
		Plomo	3854.61	kg	Entrada	3.15E-05	kg	GLO: market for lead ecoinvent 3.4	Huang et al., 2017
		Cobre	3056.05	kg	Entrada	2.50E-05	kg	GLO: market for metal working. average for copper product manufacturing ecoinvent 3.4	Huang et al., 2017
Instalación	Combustible	Combustóleo	56328	litros	Entrada	4.46E-04	kg	CH: market for heavy fuel oil ecoinvent 3.4	Huang et al., 2017
		Diesel	32589.23	litros	Entrada	2.28E-04	kg	GLO: market group for diesel ecoinvent 3.4	Huang et al., 2017
	Transporte	Terrestre	567	km	Entrada	4.10E-04	tonkm	GLO: market for transport, freight, lorry, unspecified ecoinvent 3.4	Silva, 2020
		Barco	390	km	Entrada	2.82E-04	tonkm	GLO: transport, freight, sea, transoceanic ship ecoinvent 3.4	Silva, 2020

<sup>1</sup> La cantidad de material requerido por ese componente o equipo por aerogenerador, según lo reportado por la literatura.

<sup>2</sup> La cantidad total es el valor obtenido con base en la unidad funcional del sistema.

**Tabla 15:** ICV Aerogenerador Offshore (Continuación)

Equipo	Componente	Material	Cantidad <sup>1</sup>	Unidad	Tipo	Total <sup>2</sup>	Unidad	Modulo Ecoinvent 3.4	Referencia
Mantenimiento	Palas de rotor	Fibra de vidrio	7.8	ton	Entrada	6.37E-05	kg	GLO: market for glass fibre ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
		Resina Epoxica	11.7	ton	Entrada	9.56E-05	kg	GLO: market for epoxy resin ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
	Caja de cambios	Hierro Fundido	9139	kg	Entrada	7.47E-05	kg	GLO: market for cast iron ecoinvent 3.4	Dones et al., 2007
		Acero cromado	9139	kg	Entrada	7.47E-05	kg	GLO: market for metal working. average for chromium steel product manufacturing ecoinvent 3.4	Dones et al., 2007
		Caucho	100	kg	Entrada	8.17E-07	kg	GLO: market for synthetic rubber ecoinvent 3.4	Dones et al., 2007
	Generador	Silica	0.195	ton	Entrada	1.59E-06	kg	GLO: market for silica sand ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
		Cobre	2	ton	Entrada	1.63E-05	kg	GLO: market for metal working. average for copper product manufacturing ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
		Acero	4.29	ton	Entrada	3.50E-05	kg	GLO: market for metal working. average for chromium steel product manufacturing ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
	Palas de rotor	Fibra de vidrio	7.8	ton	Salida	6.37E-05	kg	GLO: market for glass fibre ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
		Resina Epoxica	11.7	ton	Salida	9.56E-05	kg	GLO: market for epoxy resin ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015

<sup>1</sup> La cantidad de material requerido por ese componente o equipo por aerogenerador, según lo reportado por la literatura.

<sup>2</sup> La cantidad total es el valor obtenido con base en la unidad funcional del sistema.

**Tabla 15:** ICV Aerogenerador Offshore (Continuación)

Equipo	Componente	Material	Cantidad <sup>1</sup>	Unidad	Tipo	Total <sup>2</sup>	Unidad	Modulo Ecoinvent 3.4	Referencia
<b>Generación</b>									
Mantenimiento	Caja de cambios	Hierro Fundido	9139	kg	Salida	7.47E-05	kg	GLO: market for cast iron ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
		Acero cromado	9139	kg	Salida	7.47E-05	kg	GLO: market for metal working. average for chromium steel product manufacturing ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
		Caucho	100	kg	Salida	8.17E-07	kg	GLO: market for synthetic rubber ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
	Generador	Silica	0.195	ton	Salida	1.59E-06	kg	GLO: market for silica sand ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
		Cobre	2	ton	Salida	1.63E-05	kg	GLO: market for metal working. average for copper product manufacturing ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
		Acero	4.29	ton	Salida	3.50E-05	kg	GLO: market for metal working. average for chromium steel product manufacturing ecoinvent 3.4	Vargas et al., 2015
	Insumos	Lubricante	451.2	ton	Entrada	3.69E-03	kg	GLO: market for lubricating oil ecoinvent 3.4	Haapala y Prempreeda, 2014
	Equipo	Componente	Material	Cantidad <sup>1</sup>	Unidad	Tipo	Total <sup>2</sup>	Unidad	Modulo Ecoinvent 3.4
<b>Fin de Vida</b>									
Reciclaje	Metales	Acero	90	Porcentaje	Salida	1.15E-03	kg	GLO: Credit for recycling of steel scrap ts	Guezuraga et al., 2012
		Hierro			Salida	3.15E-04	kg	Valorización del Hierro	Raadal et al., 2014
		Cobre			Salida	4.04E-05	kg	Valorización del Cobre	Guezuraga et al., 2012

<sup>1</sup> La cantidad de material requerido por ese componente o equipo por aerogenerador, según lo reportado por la literatura.

<sup>2</sup> La cantidad total es el valor obtenido con base en la unidad funcional del sistema.

**Tabla 15:** ICV Aerogenerador Offshore (Continuación)

Equipo	Componente	Material	Cantidad <sup>1</sup>	Unidad	Tipo	Total <sup>2</sup>	Unidad	Modulo Ecoinvent 3.4	Referencia
<b>Fin de Vida</b>									
Reciclaje	Varios	Cables	66		Salida	4.11E-05	kg	GLO: market for cable. unspecified ecoinvent 3.4	Raadal et al., 2014
Relleno Sanitario	Metales	Acero	10	Porcentaje	Salida	7.81E-04	kg	EU-28: Ferro metals on landfills	Guezuraga et al., 2012
		Hierro			Salida	3.49E-05	kg		Raadal et al., 2014
		Cobre			Salida	4.49E-06	kg		Guezuraga et al., 2012
	Varios	Concreto	100		Salida	1.64E-02	kg	GLO: market for inert material landfill ecoinvent 3.4	Guezuraga et al., 2012
		Caucho			Salida	1.63E-06	kg	EU-28: Municipal solid waste on landfills	Guezuraga et al., 2012
		Fibra de vidrio			Salida	1.35E-04	kg		Huang et al., 2017
		Resina Epoxica			Salida	2.03E-04	kg		Huang et al., 2017
Cables	34	Salida	2.12E-05	kg	Raadal et al., 2014				

<sup>1</sup> La cantidad de material requerido por ese componente o equipo por aerogenerador, según lo reportado por la literatura.

<sup>2</sup> La cantidad total es el valor obtenido con base en la unidad funcional del sistema.

A continuación, se hace un análisis de los materiales necesario para la fabricación y mantenimiento de los diferentes componentes que integran el aerogenerador offshore estudiado. En la Tabla 16, se resumen dichos materiales.

**Tabla 16:** Materiales del aerogenerador offshore.

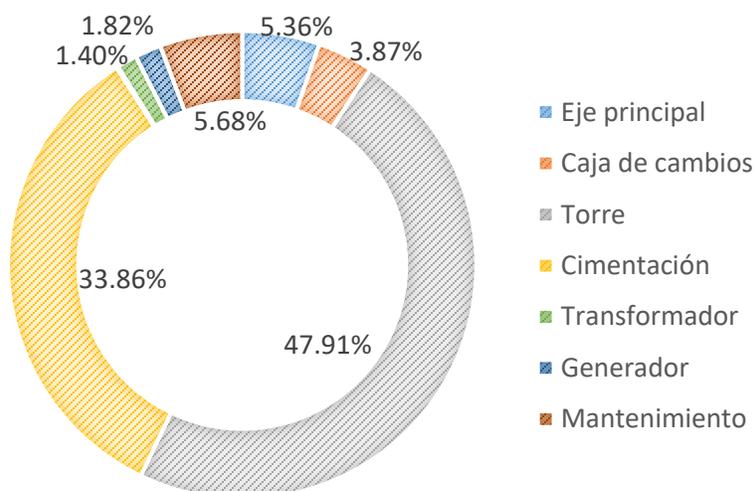
Material	Ton por dispositivo	Total <sup>1</sup>	Unidad
Acero	236.30	1.93E-03	kg
Caucho	0.20	1.63E-06	kg
Cobre	8.56	6.99E-05	kg
Fibra de vidrio	16.52	1.35E-04	kg
Hierro	42.78	3.49E-04	kg
Plástico	0.44	3.62E-06	kg
Plomo	3.85	3.15E-05	kg
Resina epoxica	24.79	2.03E-04	kg
Sílice	0.539	4.40E-06	kg

<sup>1</sup> Cantidad total obtenida con base en el material requerido por aerogenerador para la unidad funcional del sistema.

Como se observa en la Tabla 16, el acero es el material que más se utiliza en la fabricación del aerogenerador offshore estudiado en este trabajo, representa poco menos del 71% del consumo de

materiales, lo cual se muestra congruente con otros estudios, donde este material representa entre un 70 hasta un 83% de los materiales requeridos (Huang et al., 2017; Topham et al., 2019).

En la Figura 23, se muestran los porcentajes relativos al consumo de acero de acuerdo a los diferentes componentes que integran el aerogenerador. La estructura de soporte, conformada por la cimentación y la torre tienen una contribución relativa del 33.86% y 47.91% respectivamente coincidiendo con otros estudios (Wagner et al., 2011). El mantenimiento, en el cual se requiere la fabricación de una nueva caja de cambios y un generador para cambiarlos, consume acero en un 5.68% siendo el tercero más alto en los requerimientos de este material. Por otra parte, el cable submarino consume tan solo el 0.11% del acero total requerido, por lo cual no se aprecia en la Figura 23.



**Figura 23:** Acero requerido a lo largo del ciclo de vida de un aerogenerador offshore.

El hierro es el segundo material más utilizado, y el cuál es aproximadamente hasta un 11% de los materiales requeridos (Topham et al., 2019), el cual es necesario para la manufactura de los equipos que integran la turbina: (i) rotor, específicamente en la construcción del buje; (ii) góndola, en la estructura de la caja de cambios y la carcasa; (iii) generador. Los materiales que menos cantidad utiliza el aerogenerador analizado son el caucho (0.06%) y el plástico (0.13%).

#### 4.1.2. BOYA CON BRAZO

A continuación, en la Tabla 17, se presenta el inventario de ciclo de vida de un sistema de extracción de energía undimotriz del tipo absorbedor puntual “boya con brazo” de acuerdo a las etapas de construcción, generación y fin de vida, así como las sub-etapas que integran a cada una de ellas.

**Tabla 17:** ICV Boya con Brazo.

Equipo	Componente	Material	Cantidad <sup>1</sup>	Unidad	Tipo	Total <sup>2</sup>	Unidad	Módulo Ecoinvent 3.4	Referencia
Soporte	Cimentación	Cemento	307696	kg	Entrada	3.51E-02	kg	CH: market for cement. unspecified ecoinvent 3.4	Bonher S.A. de C.V., 2014 Pinto, 2017 García et al., 2019
		Arena	1280	kg	Entrada	1.46E-04	kg	GLO: market for sand ecoinvent 3.4	
		Grava	1312	kg	Entrada	1.50E-04	kg	CH: market for gravel. round ecoinvent 3.4	
		Agua	246.1539	m <sup>3</sup>	Entrada	2.80E-02	kg	GLO: market group for tap water ecoinvent 3.4	
		Acero	365.72	ton	Entrada	4.17E-02	kg	GLO: market for metal working. average for steel product manufacturing ecoinvent 3.4	
	Estructura en el Muelle	Cemento	21538.72	kg	Entrada	2.46E-03	kg	CH: market for cement. unspecified ecoinvent 3.4	
		Arena	11.648	kg	Entrada	1.33E-06	kg	GLO: market for sand ecoinvent 3.4	
		Grava	11.872	kg	Entrada	1.36E-06	kg	CH: market for gravel. round ecoinvent 3.4	
		Agua	17.2308	m <sup>3</sup>	Entrada	1.96E-03	kg	GLO: market group for tap water ecoinvent 3.4	
Sistema de Capatación	Boya	Acero	2.3	ton	Entrada	2.63E-04	kg	GLO: market for metal working. average for steel product manufacturing ecoinvent 3.4	

<sup>1</sup> La cantidad de material requerido por ese componente o equipo por boya con brazo, según lo reportado por la literatura.

<sup>2</sup> La cantidad total es el valor obtenido con base en la unidad funcional del sistema.

**Tabla 17:** ICV Boya con Brazo (Continuación)

Equipo	Componente	Material	Cantidad <sup>1</sup>	Unidad	Tipo	Total <sup>2</sup>	Unidad	Módulo Ecoinvent 3.4	Referencia
<b>Construcción</b>									
Sistema de Capatación	Brazo	Acero	2.3	ton	Entrada	2.63E-04	kg	GLO: market for metal working. average for steel product manufacturing ecoinvent 3.4	
Sistema de Conversión	Contenedor	Acero	105	ton	Entrada	1.20E-02	kg	GLO: market for metal working. average for steel product manufacturing ecoinvent 3.4	Bonher S.A. de C.V., 2014 Pinto, 2017 García et al., 2019
	Tanque Hidráulico	Acero	211	kg	Entrada	2.41E-05	kg	GLO: market for metal working. average for steel product manufacturing ecoinvent 3.4	
	Acumulador	Acero	517	kg	Entrada	2.36E-04	kg	GLO: market for metal working. average for steel product manufacturing ecoinvent 3.4	
	Manómetro	Acero	0.4	kg	Entrada	9.13E-08	kg	GLO: market for metal working. average for steel product manufacturing ecoinvent 3.4	
	Válvulas	Acero	103.19	kg	Entrada	1.18E-05	kg	GLO: market for metal working. average for steel product manufacturing ecoinvent 3.4	
		Aluminio	2.92	kg	Entrada	3.33E-07	kg	GLO: market for metal working. average for aluminium product	

<sup>1</sup> La cantidad de material requerido por ese componente o equipo por brazo con boya, según lo reportado por la literatura.

<sup>2</sup> La cantidad total es el valor obtenido con base en la unidad funcional del sistema.

**Tabla 17:** ICV Boya con Brazo (Continuación)

Equipo	Componente	Material	Cantidad <sup>1</sup>	Unidad	Tipo	Total <sup>2</sup>	Unidad	Módulo Ecoinvent 3.4	Referencia
<b>Construcción</b>									
Sistema de Conversión	Válvulas	Termoplástico	0.27	kg	Entrada	3.08E-08	kg	DE: Thermoplastic polyurethane (TPU. TPE-U) adhesive ts	
Sistema de Generación	Generador		1	pza	Entrada	1.14E-07	pza	GLO: market for generator, 200kW electrical ecoinvent 3.4	Bonher S.A. de C.V., 2014 Pinto, 2017 García et al., 2019
	Motor Hidráulico	Acero	110	kg	Entrada	2.51E-05	kg	GLO: market for metal working. average for steel product manufacturing ecoinvent 3.4	
	Motor Trifásico	Hierro	15	kg	Entrada	1.71E-06	kg	GLO: market for cast iron ecoinvent 3.4	
Instalación	Combustible	Diesel	392.31	litros	Entrada	3.83E-05	kg	GLO: market group for diesel ecoinvent 3.4	
		Lubricante	11.2	litros	Entrada	1.13E-06	kg	GLO: market for lubricating oil ecoinvent 3.4	
	Transporte	Terrestre	2637	km	Entrada	6.11E-03	tonkm	GLO: market for transport, freight, lorry, unspecified ecoinvent 3.4	
		Diesel	25	litros	Entrada	2.44E-06	kg	GLO: market group for diesel ecoinvent 3.4	
<b>Generación</b>									
Mantenimiento	Aceite		1200	litros	Entrada	1.10E-04	kg	GLO: market for lubricating oil ecoinvent 3.4	Bonher S.A. de C.V., 2014 Pinto, 2017 García et al., 2019
	Aditivos		120	litros	Entrada	1.21E-05	kg	GLO: market for petrol. 15% ETBE additive by volume. with ethanol from biomass ecoinvent 3.4	

<sup>1</sup> La cantidad de material requerido por ese componente o equipo por brazo con boya, según lo reportado por la literatura.

<sup>2</sup> La cantidad total es el valor obtenido con base en la unidad funcional del sistema.

**Tabla 17:** ICV Boya con Brazo (Continuación)

Equipo	Componente	Material	Cantidad <sup>1</sup>	Unidad	Tipo	Total <sup>2</sup>	Unidad	Módulo Ecoinvent 3.4	Referencia
<b>Generación</b>									
Mantenimiento		Aceite	1200	litros	Salida	1.10E-04	kg	GLO: market for lubricating oil ecoinvent 3.4	Bonher S.A. de C.V., 2014 Pinto, 2017 García et al., 2019
		Aditivos	120	litros	Salida	1.21E-05	kg	GLO: market for petrol. 15% ETBE additive by volume. with ethanol from biomass ecoinvent 3.4	
<b>Fin de Vida</b>									
Reciclaje	Metales	Acero	90	Porcentaje	Salida	1.15E-02	kg	GLO: Credit for recycling of steel scrap <LC>	Karan et al., 2019
		Aluminio			Salida	3.00E-07	kg	Valorización del Aluminio	
		Hierro			Salida	1.54E-06	kg	Valorización del Hierro	
Relleno Sanitario	Metales	Acero	10	Porcentaje	Salida	4.30E-02	kg	EU-28: Ferro metals on landfill ts	Karan et al., 2019
		Aluminio			Salida	3.33E-08	kg		
		Hierro			Salida	1.71E-07	kg		
	Varios	Concreto	100		Salida	2.23E-01	kg	GLO: market for inert material landfill ecoinvent 3.4	

<sup>1</sup> La cantidad de material requerido por ese componente o equipo por brazo con boya, según lo reportado por la literatura.

<sup>2</sup> La cantidad total es el valor obtenido con base en la unidad funcional del sistema.

La Tabla 18, muestra los materiales que son requeridos a lo largo del ciclo de vida para la obtención de un dispositivo de extracción de energía undimotriz del tipo absorbedor puntual.

**Tabla 18:** Materiales requeridos por una Boya con Brazo.

Material	Ton por dispositivo	Total <sup>1</sup>	Unidad
Cemento	329.23	3.76E-02	kg
Arena	1.29	1.47E-04	kg
Grava	1.32	1.51E-04	kg
Agua	0.26	3.00E-02	kg
Acero	476.26	5.46E-02	kg

<sup>1</sup> Cantidad total obtenida con base en el material requerido para la boya con brazo para la unidad funcional del sistema.

**Tabla 18:** Materiales requeridos por una Boya con Brazo (Continuación).

Material	Ton por dispositivo	Total <sup>1</sup>	Unidad
Aluminio	2.92E-03	3.33E-07	kg
Termoplástico	2.70E-04	3.08E-08	kg
Hierro	0.015	1.71E-06	kg

<sup>1</sup> Cantidad total obtenida con base en el material requerido para la boya con brazo para la unidad funcional del sistema

Como se observa en la Tabla 18, el acero y el cemento son los materiales de los que mayor cantidad se requiere para el dispositivo de extracción de energía undimotriz tipo Boya con Brazo, a estos materiales les corresponden el 44.57% y el 30.70% respectivamente. Las grandes cantidades de acero necesario para la fabricación de los dispositivos de generación de energía oceánica es una constante señalada por diversos autores (Uihlein, 2016; Paredes et al., 2019). Por otro lado, la arena y la grava que se requieren para la sub-etapa de soporte son tan solo 0.12% cada una, el aluminio y el termoplástico necesarios para diferentes válvulas del sistema de conversión en su conjunto son, conjuntamente, el 0.00030% del total de materiales requeridos y el hierro, que se requiere para el sistema de conversión es de tan solo el 0.0014% del total de materiales.

Es importante resaltar que existe un alto consumo de agua durante la etapa de soporte, debido a que para la fabricación del concreto el recurso hídrico es indispensable y por ello su consumo es del 24.49% de los materiales requeridos.

De igual forma, a lo largo del ciclo de vida del dispositivo analizado se requieren distintos combustibles, las cantidades utilizadas se muestran en la Tabla 19.

**Tabla 19:** Combustibles requeridos por la Boya con Brazo.

Material	Its por dispositivo	Total <sup>1</sup>	Unidad
Diesel	392.31	4.08E-05	kg
Lubricante	11.2	1.13E-06	kg
Aceite	1200	1.10E-04	kg
Aditivos	120	1.21E-05	kg

<sup>1</sup> Cantidad total obtenida con base en el material requerido para la boya con brazo para la unidad funcional del sistema.

En la Tabla 19, se puede observar que el combustible que más se utiliza a lo largo del ciclo de vida de la boya con brazo es el aceite en un 67%, este recurso es necesario para el mantenimiento del dispositivo, mientras que el lubricante es tan solo del 0.7% del total.

### 4.1.3. MUTRIKU

En la Tabla 20, se presenta el inventario de ciclo de vida de un sistema de extracción de energía undimotriz del tipo columna de agua oscilante de la Planta de Energía Undimotriz del Puerto de Mutriku en España, de acuerdo a las etapas de construcción, generación y fin de vida, así como las sub-etapas que integran a cada una de ellas.

**Tabla 20:** ICV Mutriku.

Equipo	Componente	Material	Cantidad <sup>1</sup>	Unidad	Tipo	Total <sup>2</sup>	Unidad	Modulo Ecoinvent 3.4	Referencia
Soporte	Dique en Talud	Piedra Caliza	21285	ton	Entrada	4.32E+00	kg	CH: market for limestone. unprocessed ecoinvent 3.4	Adaptado desde Aracelay, 2020
		Concreto	148.8	m <sup>3</sup>	Entrada	3.02E-05	m <sup>3</sup>	CH: market for concrete. normal ecoinvent 3.4	Adaptado desde Torre-Enciso, 2009
	Cimentación	Acero	1844.352	kg	Entrada	3.74E-04	kg	GLO: market for metal working. average for steel product manufacturing ecoinvent 3.4	Adaptado desde Torre-Enciso, 2009
Planta Undimotriz	Cámaras de Aire	Concreto	2151.216	m <sup>3</sup>	Entrada	4.36E-04	m <sup>3</sup>	CH: market for concrete. normal ecoinvent 3.4	Adaptado desde Torre-Enciso, 2009
		Piedra Caliza	7648.9374	ton	Entrada	1.55E+00	kg	CH: market for limestone. unprocessed ecoinvent 3.4	Adaptado desde Torre-Enciso, 2009
	Sala de Turbinas	Concreto	2045.41	m <sup>3</sup>	Entrada	4.15E-04	m <sup>3</sup>	CH: market for concrete. normal ecoinvent 3.4	Adaptado desde Torre-Enciso, 2009
	Pavimentación	Concreto	1280	m <sup>3</sup>	Entrada	2.60E-04	m <sup>3</sup>	CH: market for concrete. normal ecoinvent 3.4	Adaptado desde Torre-Enciso, 2009
	Equipos	Acero	1200	kg	Entrada	3.90E-03	kg	GLO: market for metal working. average for steel product manufacturing ecoinvent 3.4	Adaptado desde Torre-Enciso, 2009

<sup>1</sup> La cantidad de material requerido por ese componente o equipo por Central Undimotriz de Mutriku, según lo reportado por la literatura.

<sup>2</sup> La cantidad total es el valor obtenido con base en la unidad funcional del sistema.

**Tabla 20:** EICV Mutriku (Continuación)

Equipo	Componente	Material	Cantidad <sup>1</sup>	Unidad	Tipo	Total <sup>2</sup>	Unidad	Modulo Ecoinvent 3.4	Referencia	
<b>Generación</b>										
Mantenimiento	Sistema Eléctrico	Termoplástico	9100	kg	Entrada	1.85E-03	kg	DE: Thermoplastic polyurethane (TPU. TPE-U) adhesive ts	Lekube, 2021	
	Servicios	Agua	6000	m <sup>3</sup>	Entrada	1.21E+00	kg	GLO: market group for tap water ecoinvent 3.4	Lekube, 2021	
	Sistema Mecánico	Lubricante		0.104	m <sup>3</sup>	Entrada	1.87E-05	kg	GLO: market for lubricating oil ecoinvent 3.4	Lekube, 2021
		Acero		151.2	kg	Entrada	3.07E-05	kg	GLO: market for metal working. average for steel product manufacturing ecoinvent 3.4	Lekube, 2021
		Magnesio		138.6	kg	Entrada	2.81E-05	kg	GLO: market for magnesium ecoinvent 3.4	Lekube, 2021
		Aluminio		2.9414	ton	Entrada	5.97E-04	kg	GLO: market for metal working. average for aluminium product manufacturing ecoinvent 3.4	Lekube, 2021
<b>Fin de Vida</b>										
Reciclaje	Metales	Acero	90	Porcentaje	Salida	3.53E-03	kg	GLO: Credit for recycling of steel scrap ts	Karan et al., 2019	
		Aluminio			Salida	5.62E-04	kg	Valorización del Aluminio		

<sup>1</sup> La cantidad de material requerido por ese componente o equipo por por Central Undimotriz de Mutriku, según lo reportado por la literatura.

<sup>2</sup> La cantidad total es el valor obtenido con base en la unidad funcional del sistema.

**Tabla 20:** EICV Mutriku (Continuación)

Equipo	Componente	Material	Cantidad <sup>1</sup>	Unidad	Tipo	Total <sup>2</sup>	Unidad	Modulo Ecoinvent 3.4	Referencia
<b>Fin de Vida</b>									
Relleno Sanitario	Metales	Acero	10	Porcentaje	Salida	7.67E-04	kg	EU-28: Ferro metals on landfill ts	Karan et al., 2019
		Aluminio			Salida	6.25E-05	kg		
	Varios	Concreto	100		Salida	2.62E+00	kg	GLO: market for inert material landfill ecoinvent 3.4	
		Piedra Caliza			Salida	5.87E+00	kg	EU-28: Municipal solid waste on landfill ts	
		Termoplástico			Salida	1.85E-03	kg		

<sup>1</sup> La cantidad de material requerido por ese componente o equipo por por Central Undimotriz de Mutriku, según lo reportado por la literatura.

<sup>2</sup> La cantidad total es el valor obtenido con base en la unidad funcional del sistema.

La Tabla 21, muestra los materiales que son requeridos a lo largo del ciclo de vida para la obtención de un dispositivo de extracción de energía undimotriz de columna de agua oscilante.

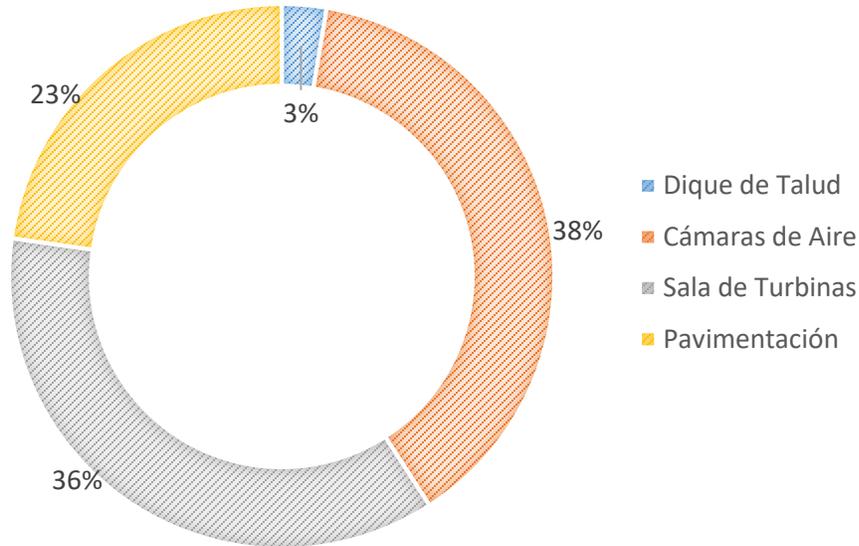
**Tabla 21:** Materiales requeridos por la Planta de Energía Undimotriz de Mutriku, España.

Material	Toneladas	Total <sup>1</sup>	Unidad
Acero	3.20E+00	4.30E-03	kg
Aluminio	2.94E+00	5.97E-04	kg
Concreto	1.29E+04	2.62E+00	kg
Magnesio	1.39E-01	2.81E-05	kg
Piedra Caliza	2.89E+04	5.87E+00	kg
Termoplástico	9.10E+00	1.85E-03	kg

<sup>1</sup> Cantidad total obtenida con base en el material requerido por la Planta de Energía Undimotriz en Mutriku, España para la unidad funcional del sistema.

Como se puede observar en la Tabla 21, son tanto el Concreto como la Piedra Caliza, los dos materiales con mayor contribución en cantidad requerida para la construcción y correcto funcionamiento de la planta de energía de las olas. Donde la piedra caliza representa el 69% del peso total de materiales requeridos, el concreto el 30% y el resto esta repartido en los demás materiales. El aluminio, es el material que menos cantidad se consume y representa tan solo el 0.0070% del peso.

La Piedra Caliza se utilizó tanto como para el Dique de Talud o rompeolas, específicamente en el manto tanto interior como exterior, así como relleno en los bloques pre-fabricados de concreto con los que se construyó la planta undimotriz. El dique de talud representa el 74% del total de piedra caliza utilizada en este sistema, mientras que el otro 26% corresponde a la que se requirió para las cámaras de aire.



**Figura 24:** Concreto requerido a lo largo del ciclo de vida de la planta de energía undimotriz de Mutriku, España.

En la Figura 24, se muestra el porcentaje de concreto correspondiente a cada uno de los componentes que requieren de este material y que el 30% del concreto consumido en este sistema. La cantidad total de concreto requerida, 30% de los materiales utilizados por el sistema, es poco menos de la mitad de lo reportado para otros sistemas de energía undimotriz, donde este representa alrededor del 75% (Dahlsten, 2009). A pesar de esta diferencia significativa, es importante mencionar que esta diferencia se debe principalmente a la gran variedad de dispositivos de extracción de energía a través de las olas que existen hoy en día.

## 4.2. EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA E INTERPRETACIÓN

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la evaluación de impacto de cada uno de los dispositivos de energía oceánica estudiados.

### 4.2.1. ANÁLISIS GENERAL

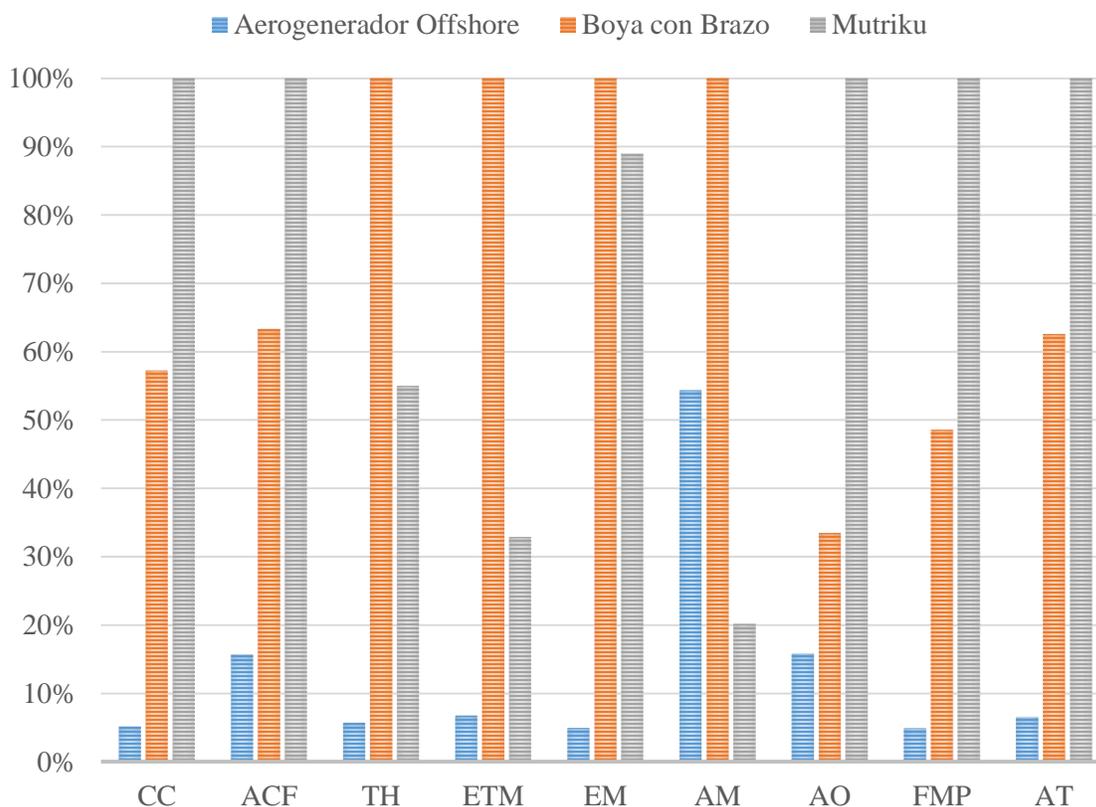
Como ya se ha mencionado, los sistemas de generación de energía renovable, a pesar de considerarse energías limpias o bajas en carbono, estas siguen consumiendo energía de manera directa y/o indirecta, y por lo tanto generan impactos ambientales a lo largo de ciclo de vida. Estos impactos, están generalmente asociados a factores como el tamaño de la instalación, la ubicación seleccionada, el tipo de extracción de energía, las diferentes opciones de diseño, entre otros (Rule et al., 2009; Uihlein, 2016; Paredes et al., 2019).

A continuación, la Tabla 22 muestra la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV) por etapas de las tecnologías de extracción de energía del océano evaluadas.

**Tabla 22:** EICV de los sistemas estudiados.

Categoría	Siglas	Etapa								
		Construcción			Generación			Fin de vida		
		Aerogenerador Offshore	Boya con Brazo	Mutriku	Aerogenerador Offshore	Boya con Brazo	Mutriku	Aerogenerador Offshore	Boya con Brazo	Mutriku
Cambio Climático [kg CO2 eq.]	CC	7.29E-03	1.45E-01	1.95E-01	6.31E-03	1.68E-04	1.24E-02	-1.76E-03	-1.58E-02	1.79E-02
Agotamiento de los Combustibles Fósiles [kg combustible eq.]	ACF	2.95E-03	3.76E-02	2.81E-02	6.05E-03	1.84E-04	5.31E-03	-3.40E-04	-2.94E-03	2.16E-02
Toxicidad Humana [kg 1,4-DB eq.]	TH	7.38E-03	7.16E-02	3.32E-02	3.10E-03	5.89E-05	1.72E-03	-6.36E-03	2.25E-04	4.67E-02
Ecotoxicidad Marina [kg 1,4-DB eq.]	ETM	3.01E-04	4.20E-03	1.07E-03	8.37E-05	1.56E-06	1.76E-04	-9.96E-05	2.30E-06	1.43E-04
Eutrofización Marina [kg N eq.]	EM	2.05E-06	5.30E-05	3.83E-05	1.30E-06	3.72E-08	2.15E-06	-7.47E-07	-5.46E-07	6.26E-06
Agotamiento de los Recursos Minerales [kg Fe eq.]	AM	4.13E-03	3.55E-02	7.94E-03	7.73E-04	9.84E-06	2.05E-04	-3.16E-03	-1.96E-02	-4.93E-03
Agotamiento de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq.]	AO	8.74E-10	6.58E-09	9.48E-09	2.46E-09	7.90E-11	3.88E-10	9.38E-12	3.96E-10	1.12E-08
Formación de Material Particulado [kg PM10 eq.]	FMP	2.10E-05	3.20E-04	5.66E-04	1.50E-05	3.84E-07	1.59E-05	-4.56E-06	-7.31E-06	6.25E-05
Acidificación Terrestre [kg SO2 eq.]	AT	3.50E-05	5.56E-04	6.75E-04	3.56E-05	9.84E-07	2.97E-05	-1.47E-05	-2.83E-05	1.48E-04

La Figura 25, presenta los resultados normalizados en porcentaje, de los sistemas de extracción de energía oceánica estudiados.



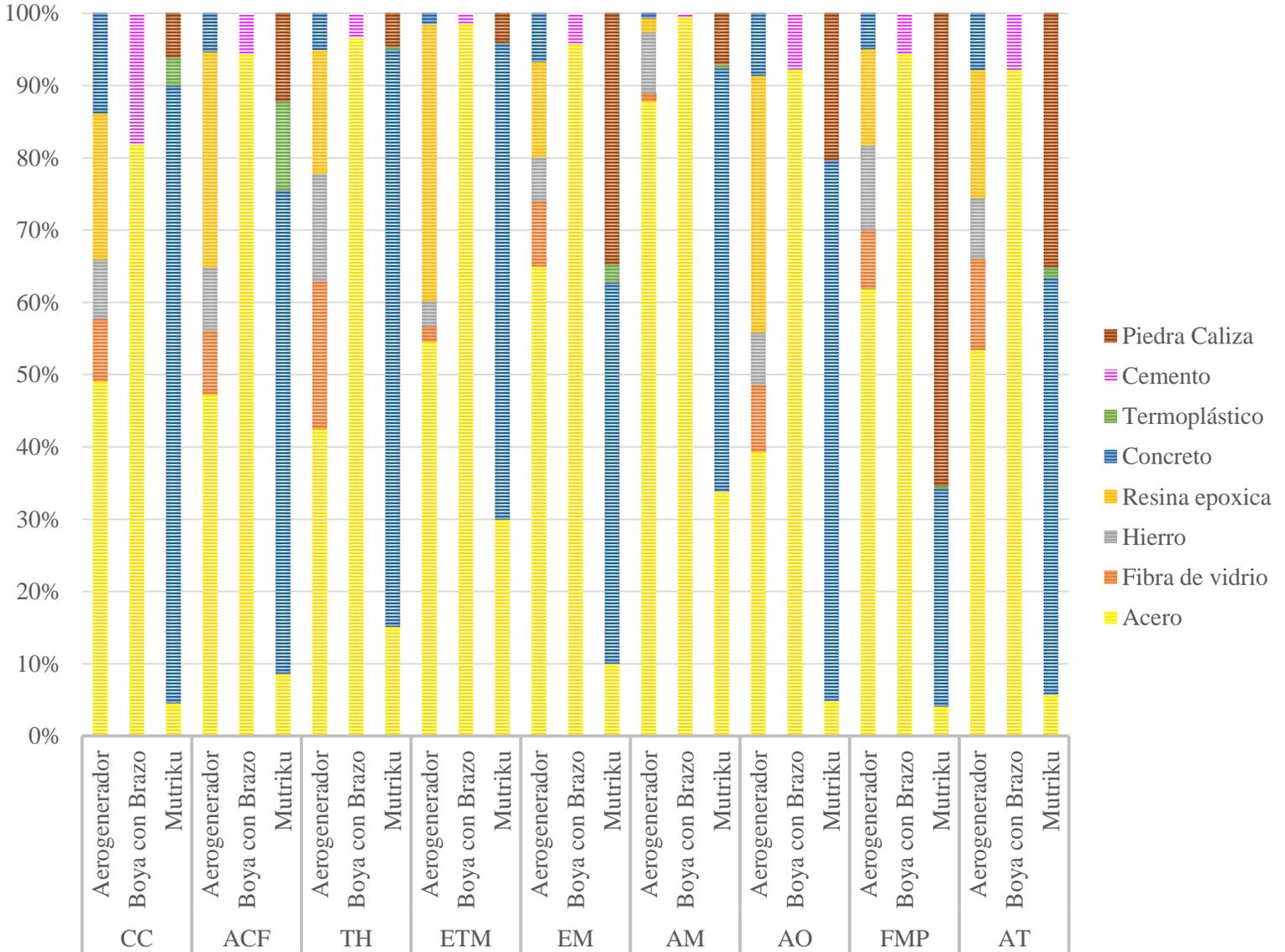
**Figura 25:** EICV con resultados normalizados de los sistemas de generación de energía a través del océano estudiados.

CC: Cambio Climático. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles. TH: Toxicidad Humana. ETM: Eco-Toxicidad Marina. EM: Eutrofización Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. FMP: Formación de Material Particulado. AT: Acidificación Terrestre.

En la Figura 25, se puede observar que la Planta de Energía Undimotriz localizada en Mutriku, España, es el dispositivo con mayor contribución ambiental en cinco de las nueve categorías de impacto, seguido por la Boya con Brazo que aporta mayores impactos en cuatro de las nueve categorías. Lo anterior corresponde a lo que podría esperarse, puesto que la potencia nominal del aerogenerador offshore es de 2MW mientras que la de la boya con brazo es de 200kW y la Planta Undimotriz en Mutriku, a pesar de estar diseñada con una capacidad de 296 kW en la práctica la capacidad real es de aproximadamente de 120 kW. En diversos estudios de extracción de energía por fuentes renovables se ha concluido que uno de los factores en la reducción de impactos por unidad de energía producida es la potencia nominal, puesto que a mayor generación de energía menor es la intensidad de los impactos para esos dispositivos (Lenzen y Munksgard, 2002; Tremeac y Meunier, 2009; Kadiyala et al., 2017; Karan et al., 2019).

Una de las características de los dispositivos de energía oceánica, en comparación con otras tecnologías de energía renovable, es que parecen exigir grandes cantidades de materiales para su fabricación (Uihlein, 2016). A continuación, se presentan los impactos ambientales de los materiales más representativos de cada sistema, Figura 26, donde se puede observar que el acero es aquel material con mayores impactos asociados en casi todas las categorías de impacto para los tres sistemas.

Los impactos asociados al acero, a lo largo del ciclo de vida de los dispositivos, oscilan de entre el 14 al 71% para el aerogenerador offshore, del 83 hasta un 215% para la boya con brazo y entre el 2 y 84% en el caso de Mutriku, en las diferentes categorías de impacto analizadas, lo que concuerda con lo reportado por Dahlsten (2009), que en el caso de sistemas de energía undimotriz el consumo de acero puede presentarse entre el 30 y el 80% de los impactos ambientales.



**Figura 26:** EICV de los materiales utilizados en cada uno de los sistemas de generación de energía a través del océano estudiados.

CC: Cambio Climático. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles. TH: Toxicidad Humana.

ETM: Eco-Toxicidad Marina. EM: Eutrofización Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. FMP: Formación de Material Particulado. AT: Acidificación Terrestre.

La influencia del consumo de acero en los impactos asociados a estos sistemas de generación de energía está claramente ligada a la etapa de construcción, puesto que es aquí donde se encuentran grandes cantidades de masa necesarias para la fabricación de los dispositivos, así como a las estructuras de soporte (Thomson et al., 2011; Karan et al., 2019; Thomson et al., 2019). Estos

impactos se deben a la extracción de materias primas como el arrabio, el ferromanganeso o el ferrocromo (Douziech et al., 2016), así como al uso de fuentes de energía no renovable durante toda la cadena productiva del acero (Burchart, 2013; Olmez et al., 2016).

La energía consumida generalmente procede de fuentes fósiles, lo que es un efecto directo de la economía mundial actual. El desempeño ambiental de los dispositivos de extracción de energía del océano incrementara a medida que la infraestructura global y la tecnología avancen hacia fuentes de suministro de energía renovables (Apolonia y Simas, 2021).

Como se puede observar en la Figura 26, los impactos ambientales son muy variados entre los sistemas de energía oceánica. Sin embargo, que los materiales necesarios para su fabricación tengan un porcentaje elevado, principalmente el acero, detona un reto debido a la necesidad de materiales alternativos, eficientes y ambientalmente sostenibles como un área de oportunidad en la búsqueda de incrementar el desempeño ambiental de estos sistemas. Para ello, CEMIE-Océano dentro de una de sus líneas de investigación esta desarrollando recubrimientos que permitan extender la vida útil de los materiales sin comprometer la eficiencia de los materiales e incrementando su resistencia ante el ambiente hostil que representa el medio marino y sin que representa un riesgo toxicológico para los organismos que el habitan.

Otro reto importante de los sistemas de generación de energía oceánica es la comparación entre estos debido a la amplia variedad en diseño, opciones de dimensiones y nivel de desarrollo (Douziech et al., 2016; Paredes et al., 2019), puesto que existen sistemas ampliamente desarrollados como lo son los aerogeneradores offshore y otros muchos que siguen en las diferentes etapas de desarrollo. Así mismo, una de las limitaciones principales en la modelización de estas tecnologías de energía marina es que hay muy poca experiencia a largo plazo, lo que aumenta la incertidumbre puesto que existen pocos datos validados sobre su operación y mantenimiento (Pennoch et al., 2021).

De igual forma a medida que se realizan los despliegues de dispositivos marinos para la extracción de energía a nivel piloto, como el caso de la boya con brazo, o ya a escala comercial, como lo es Mutriku o los aerogeneradores offshore, es necesario comprender los efectos sobre el medio marino de los diferentes componentes que integran la totalidad de los sistemas (Copping et al., 2012), de manera que poco a poco se vaya cubriendo la laguna de conocimiento. En este sentido, a pasar de que la metodología de análisis de ciclo de vida proporciona una visión holística y amplia de los impactos ambientales, debido que abarca diversas categorías de impacto, aun hay mucho conocimiento por desarrollar para poder dar una visión clara de lo que afectan estos sistemas sobre el medio marino.

Algunos de los impactos generados por sistemas de generación de energía a través del océano que ACV no contempla y que han sido identificados en la literatura como relevantes son: la perturbación de la flora y fauna marina, impacto en la mortalidad y cambio de rutas de migración tanto de especies marinas como de aves, el ruido y su impacto en la biodiversidad, cambios en los patrones de sedimentación, efectos electromagnéticos (Copping et al., 2012; Douziech et al., 2016 Thomson et al., 2019), a la falta de indicadores ambientales tan específicos del medio marino, hoy en día, se podrían estar subestimando los costos ambientales de estas tecnologías. Como respuesta a esta necesidad el grupo de investigación en Ciclo de Vida, Cambio Climático y Sostenibilidad (CiViCCS) del Instituto de Ingeniería, en el marco del proyecto CEMIE-Océano, está trabajando en el desarrollo de una categoría de impacto de análisis de ciclo de vida para la biodiversidad.

#### **4.2.1.1. AEROGENERADOR OFFSHORE**

La Tabla 23, presenta los resultados para cada categoría de impacto evaluada en este estudio, así como los reportados en la literatura para dispositivos eólicos marinos.

**Tabla 23:** EICV Aerogenerador Offshore.

Referencia	Potencia	Cimentación	CC [kg CO <sub>2</sub> eq/kWh]	AO [kg CFC-11 eq/kWh]	AT [kg SO <sub>2</sub> eq/kWh]	EM [kg N eq/kWh]	TH [kg 1,4- DCB eq/kWh]	FMP [kg PM <sub>10</sub> eq/kWh]	ETM [kg 1,4- DCB eq/kWh]	AM [kg Fe eq/kWh]	ACF [kg oil eq/kWh]
Este estudio	2 MW	Monopila	1.18E-02	3.34E-09	5.59E-05	2.60E-06	4.13E-03	3.15E-05	2.85E-04	1.74E-03	8.66E-03
Wang et al., 2019	2 MW	Flotante	4.68E-01	-	-	-	-	-	-	-	-
Chipindula et al., 2018	2 MW	Monopila	9.49E-03	-	-	-	-	-	-	-	-
Yang et al., 2018	3.6 MW	Multipile	2.55E-02	-	6.00E-05	-	-	-	-	-	-
Bonou et al., 2016	4 MW	Monopila	1.10E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
Raadal et al., 2014	5 MW	Jacket	1.89E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
Reimers et al., 2014	5 MW	Jacket	1.68E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
Wagner et al., 2011	5 MW	Jacket Tripod	3.20E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
Wiedmann et al., 2011	2 MW	-	1.34E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
Weinzettel et al., 2009	5 MW	Flotante	1.19E-02	-	1.19E-04	-	8.52E-02	-	-	-	-
Schleisner, 2000	500 kW	-	1.65E-02	-	3.00E-05	5.00E-05	-	-	-	-	-

CC: Cambio Climático. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. AT: Acidificación Terrestre. EM: Eutrofización Marina. TH: Toxicidad Humana. FMP: Formación de Material Particulado. ETM: Eco-Toxicidad Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles.

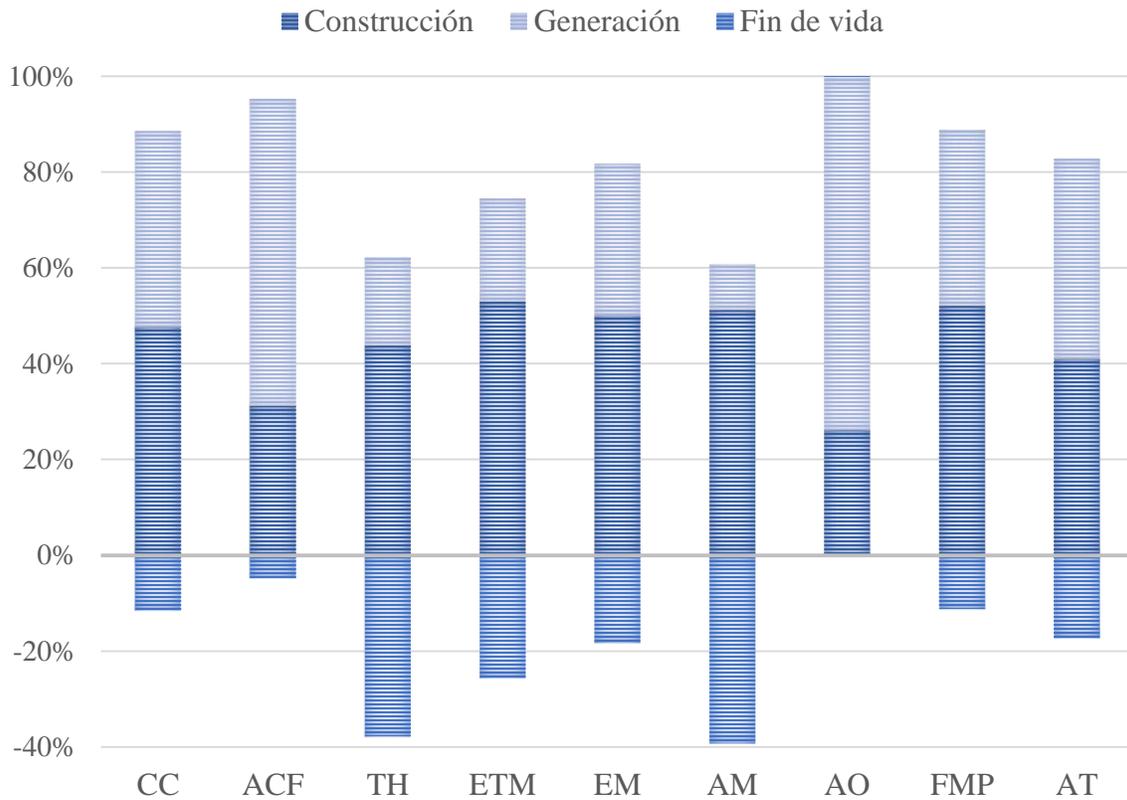
Los impactos ambientales de un aerogenerador offshore se ven influenciados por diferentes factores como la potencia nominal de la turbina, el factor de capacidad de la misma, si se trata de una estructura de soporte flotante o fija, como es el caso de la cimentación monopila estudiada en este trabajo, así como la definición de los límites del sistema, si hay o no reciclaje después del desmantelamiento, y el mix energético de cada país (Raadal et al., 2014; Reimers et al., 2014; Kaldellis et al., 2016; Kaldellis y Apostolou, 2017; Pennoch et al., 2021).

La forma en la que afectan la potencia nominal y el factor de capacidad de una turbina a su rendimiento ambiental, se debe a que a mayor potencia y factor de capacidad mayor generación de electricidad se tendrá, minimizando de esta forma sus impactos por unidad funcional (Dolan y Heath, 2012; Kadiyala et al., 2017; Wang et al., 2019), lo cual se podría suponer como obvio, sin embargo, no son los únicos dos factores que afectan al aumento o disminución de los impactos ambientales de este tipo de tecnologías.

Berrios et al. (2009) realizaron un estudio donde analizaron 5 aerogeneradores con la misma potencia nominal (2.5 MW) con el fin de conocer la influencia del sitio de la instalación, el tipo de estructura de soporte y los materiales utilizados en la fabricación de los cimientos y de la torre. Los resultados obtenidos es que efectivamente las emisiones de GEI varían dependiendo los diseños y tipos de estructuras de soporte, puesto que estas requieren diferentes materiales y cantidades para su construcción (Berrios et al., 2009). Por lo tanto, a pesar de que en la Tabla 23 muestre que existe un rango muy amplio de impactos ambientales entre los resultados obtenidos para el aerogenerador

propuesto en este trabajo y los reportados en literatura, se debe, principalmente, a que existen diferencias en cuanto a sus características.

A pesar de las diferencias en la magnitud del impacto de los diferentes estudios reportados en la Tabla 23, existen constantes como que la etapa de construcción es a lo largo del ciclo de vida de un aerogenerador offshore la que mayor contribución aporta (Berrios et al., 2009; Kaldellis et al., 2016; Wang y Teah, 2017; Yang et al., 2018; Paredes et al., 2019), lo cual es coherente con este estudio. La Figura 27, presenta los resultados porcentuales de los impactos ambientales generados por un aerogenerador offshore a lo largo de su ciclo de vida. Se puede observar que la construcción es la etapa que mayores impactos tiene en 7 de 9 categorías evaluadas. Las categorías de impacto donde la construcción no fue la etapa con mayores impactos asociados son el agotamiento de los combustibles fósiles (ACF) y el agotamiento de la capa de ozono (AO).



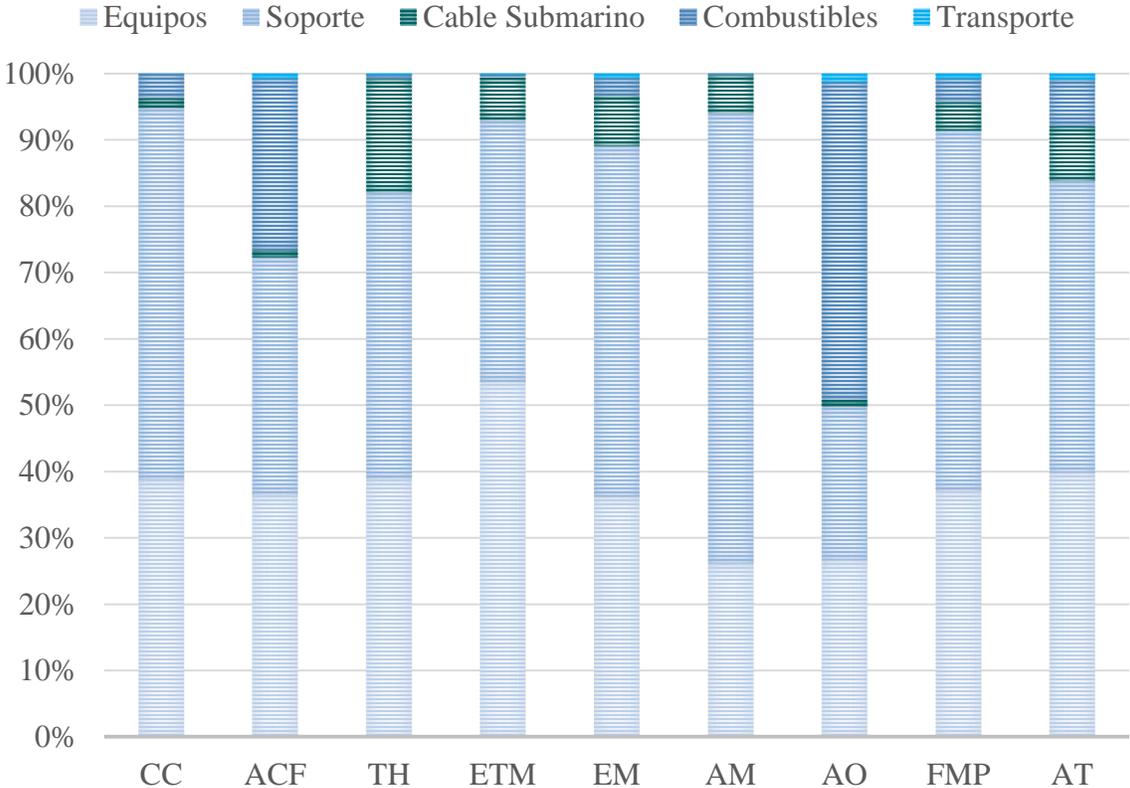
**Figura 27:** EICV Aerogenerador Offshore.

CC: Cambio Climático. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles. TH: Toxicidad Humana.

ETM: Eco-Toxicidad Marina. EM: Eutrofización Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. FMP: Formación de Material Particulado. AT: Acidificación Terrestre.

De igual forma, en la Figura 27 se observa la importancia de una correcta gestión de los diversos materiales del aerogenerador durante la etapa de fin de vida, puesto que su correcta disposición representa una reducción en los impactos ambientales asociados al sistema de generación de energía aumentando su rendimiento ambiental (Weinzettel et al., 2009; Tomporowski et al., 2012; Ortegón et al., 2013; Haapala y Prempreeda, 2014; Aso y Cheung, 2015).

En lo que se refiere a la etapa de construcción, la Figura 28 muestra las contribuciones ambientales de cada una de las sub-etapas que la integran, donde el soporte, que se refiere a la cimentación y la estructura de acero que sostiene a la turbina, es el componente clave en la contribución de los impactos ambientales, lo cual es congruente según lo reportado por Pehnt (2006) para este tipo de dispositivos, seguido por los equipos que conforman la turbina en casi todas las categorías de impacto. Por otro lado, el transporte para todas las categorías de impacto, exceptuando el agotamiento de la capa de ozono (AO) en la cual los impactos son del 1.2% aproximadamente, representa menos del 1% del total.



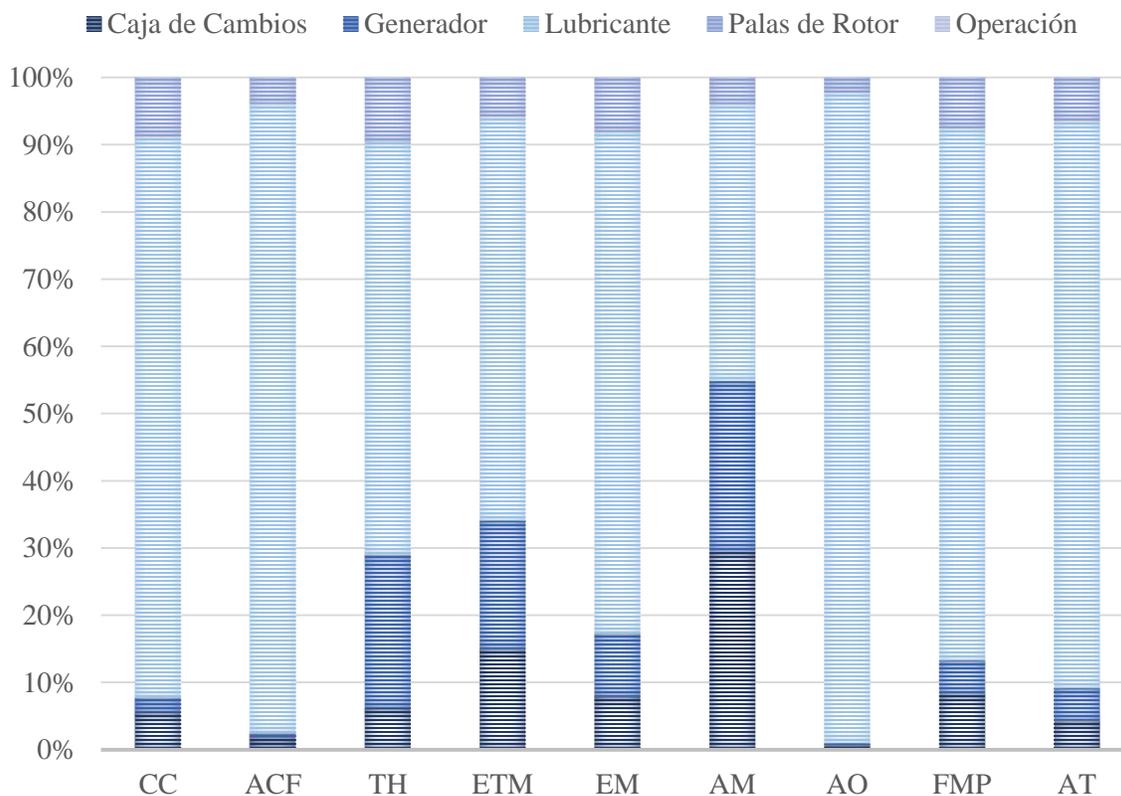
**Figura 28:** EICV Etapa de Construcción Aerogenerador Offshore.

CC: Cambio Climático. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles. TH: Toxicidad Humana. ETM: Eco-Toxicidad Marina. EM: Eutrofización Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. FMP: Formación de Material Particulado. AT: Acidificación Terrestre.

La Figura 29 muestra los impactos asociados a cada una de las sub-etapas dentro de la etapa de generación, en el ciclo de vida de un aerogenerador offshore, desglosando los diferentes componentes que se requieren para el mantenimiento (reemplazo de la caja de cambios, generador, palas de rotor y la adición del lubricante), así como la operación del dispositivo. En esta etapa del ciclo de vida, todos los impactos, para cada una de las categorías estudiadas corresponden a la sub-etapa de mantenimiento, esto es debido a que durante la operación de la turbina esta no requiere de ningún insumo o materia prima para su funcionamiento, lo que evita impactos asociados. Esta es una razón por la cual se dice que la energía eólica es una energía “más limpia” (Romera, 2010; Aso y Cheung, 2015).

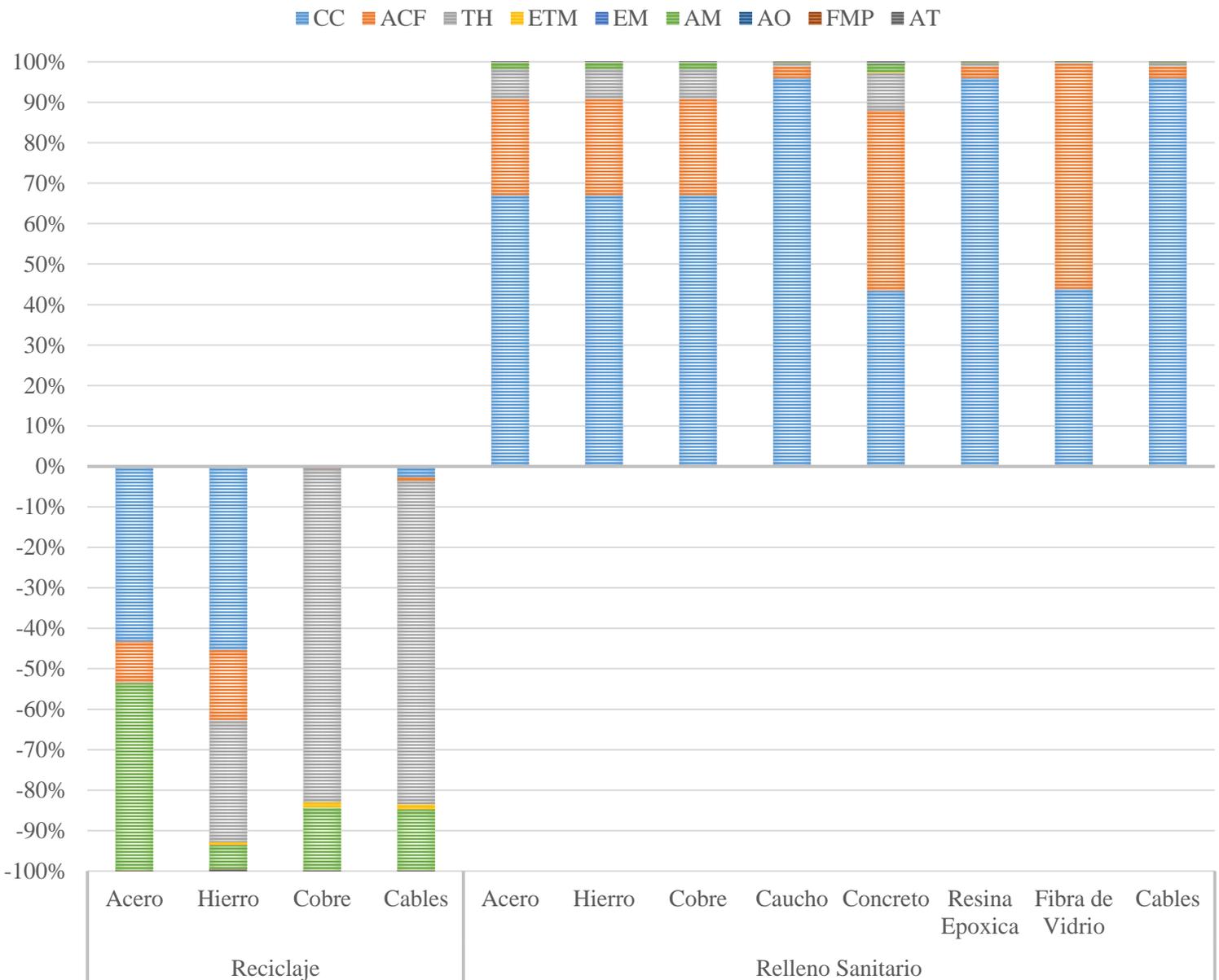
Para todas las categorías de impacto evaluadas, durante la etapa de generación, el lubricante necesario para el correcto funcionamiento del aerogenerador le corresponden la mayoría de los impactos

asociados, donde la categoría de agotamiento de los minerales (AM) tiene el 41.2% mientras que la de agotamiento de la capa de ozono (AO) tiene un 96.7%, las demás categorías varían entre estos dos porcentajes.



**Figura 29:** EICV Sub-etapas dentro de la Etapa de Generación Aerogenerador Offshore. CC: Cambio Climático. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles. TH: Toxicidad Humana. ETM: Eco-Toxicidad Marina. EM: Eutrofización Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. FMP: Formación de Material Particulado. AT: Acidificación Terrestre.

En la Figura 30, se muestran los impactos ambientales de la etapa de fin de vida de un aerogenerador offshore y donde se puede observar los dos escenarios de disposición final planteados en este trabajo: reciclaje y relleno sanitario. El reciclaje de las turbinas eólicas es de suma importancia para mejorar su rendimiento ambiental, debido a que muchos de sus componentes, sobre todos los materiales ferrosos, tiene un valor comercial (Andersen et al., 2014).



**Figura 30:** EICV Etapa de Fin de Vida Aerogenerador Offshore.

CC: Cambio Climático. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles. TH: Toxicidad Humana.

ETM: Eco-Toxicidad Marina. EM: Eutrofización Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. FMP: Formación de Material Particulado. AT: Acidificación Terrestre.

Sin embargo, debido a que las turbinas eólicas instaladas apenas están terminando su tiempo de vida útil, hay poca experiencia práctica en el reciclaje de las mismas (Larsen, 2009). Por dicha razón, a pesar de los impactos ambientales evitados por la correcta disposición de los materiales reciclables, los aerogeneradores tienen otros componentes que cuyos escenarios de disposición final no han sido estudiados de manera que terminan en rellenos sanitarios, particularmente se ha encontrado que las palas del rotor constituyen un problema ambiental importante. El problema con estos componentes del rotor radica en la fibra de vidrio y la resina epoxica utilizados para su fabricación, siendo las palas

del rotor los componentes más difíciles de reutilizar/reciclar, puesto que se tratan de materiales de bajo valor y cuando se reducen a polvo se crea un entorno de trabajo peligroso. A pesar de ello, existen diversos esfuerzos para buscar otro tipo de aprovechamiento como lo es en materiales para la construcción o su incineración para la recuperación de energía (Larsen, 2009; Andersen et al., 2014; Topham et al., 2019), en México hoy en día ninguna de esas opciones es una realidad.

En México, la industria eólica ha estado instalado aerogeneradores desde al menos el 2008, lo que hoy en día significa una capacidad máxima de generación de 6,591 MW, de los cuales el 100% corresponden a energía eólica terrestre (Bank et al., 2018; IRENA, 2020). Sin embargo, esta capacidad instalada se debe a tecnologías extranjeras, principalmente las multinacionales españolas, puesto que México no ha desarrollado un sector eólico propio con turbinas diseñadas y construidas en el país, limitando así los beneficios, pero de igual forma sigue sin políticas y regulaciones que promuevan y consoliden este sector (Martínez et al., 2019).

Debido a este retraso en la consolidación del sector eólico del país es que, en la fase de desmantelamiento, los residuos que se generan a lo largo del ciclo de vida de las turbinas tienen una disposición final sobre los rellenos sanitarios. Sin embargo, un estudio realizado por Bank et al. (2018), proponen una solución conceptual para las comunidades vulnerables de la costa del Golfo de México, específicamente para la zona de Yucatán la cual reconocen como uno de los dos estados con mayor potencial eólico, por lo que se espera tenga un crecimiento en el despliegue de parques eólicos, además de ser una zona con riesgo para las poblaciones debido a los efectos del cambio climático. Dicha propuesta consiste en reciclar las palas del rotor de los aerogeneradores para la elaboración de viviendas (Bank et al., 2018).

Los esfuerzos de investigación para una mejor disposición final de las turbinas eólicas, marinas o terrestres, no se puede llevar a cabo sin superar una serie de barreras relacionadas con la falta de eslabones importantes en la cadena de valor de la industria eólica nacional, donde la participación activa del gobierno, en la elaboración de políticas públicas adecuadas que impulsen, regulen y monitoreen este sector, instituciones académicas, que sigan desarrollando conocimiento en todas las áreas, empresas y sociedad en general.

Los resultados obtenidos en la etapa de disposición final, son congruentes con los presentados por Uihlein (2016), en el sentido de que las categorías de impacto con menores contribuciones son: toxicidad humana (TH) y formación de material particulado (FMP).

#### **4.2.1.2. BOYA CON BRAZO**

Como se ha mencionado anteriormente, existen diferentes dispositivos de extracción de energía undimotriz, los absorbedores puntuales son los más comunes y entre los cuales existen diversas configuraciones (Do et al., 2017; Gastelum, 2017; Cascajo et al., 2019). El dispositivo estudiado denominado “Boya con Brazo” es, en su categoría más general, un sistema de extracción de energía undimotriz del tipo absorbedor puntual por ello en la Tabla 24 se muestran tanto los resultados de la EICV de esta tecnología, así como de diferentes autores que han estudiado diferentes tecnologías que funcionan mediante este tipo de extracción de energía, aunque no necesariamente con un dispositivo como el descrito en este estudio (véase apartado 3.1.3.2). El dispositivo más parecido al de este estudio es el llamado Wavestar estudiado por Dalton et al. (2014).

**Tabla 24:** EICV Sistemas de Energía Undimotriz tipo Absorbedor Puntual.

Referencia	Potencia	CC kg CO <sub>2</sub> eq/kWh	AO kg CFC-11 eq/kWh	AT kg SO <sub>2</sub> /kWh	EM kg N eq/kWh	TH kg 1,4- DBC eq/kWh	FMP kg PM <sub>10</sub> /kWh	ETM kg 1,4- DCB eq/kWh	AM kg Fe eq/kWh	ACF kg oil eq/kWh
<b>Este Estudio</b>	200 kW	1.29E-01	7.06E-09	5.34E-04	5.25E-05	7.19E-02	3.13E-04	4.21E-03	1.59E-02	3.48E-02
<b>Pennoch et al., 2021</b>	10 MW*	3.44E-02	-	4.26E-04	1.98E-03	-	-	1.04E-03	-	9.63E-03
<b>Gastelum et al., 2017</b>	20 MW	3.0E-02 – 8.0E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Dahlsten, 2009</b>	20 kW*	3.9E-02 – 1.26E-01	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Uihlein, 2016</b>	Promedio 528 kW	1.05E-01	4.20E-03	-	-	-	-	-	-	-
<b>Dalton et al., 2014</b>	220 kW	4.70E-02	-	-	-	-	-	-	-	-

\* Generación total instalada, la planta cuenta con 28 dispositivos.

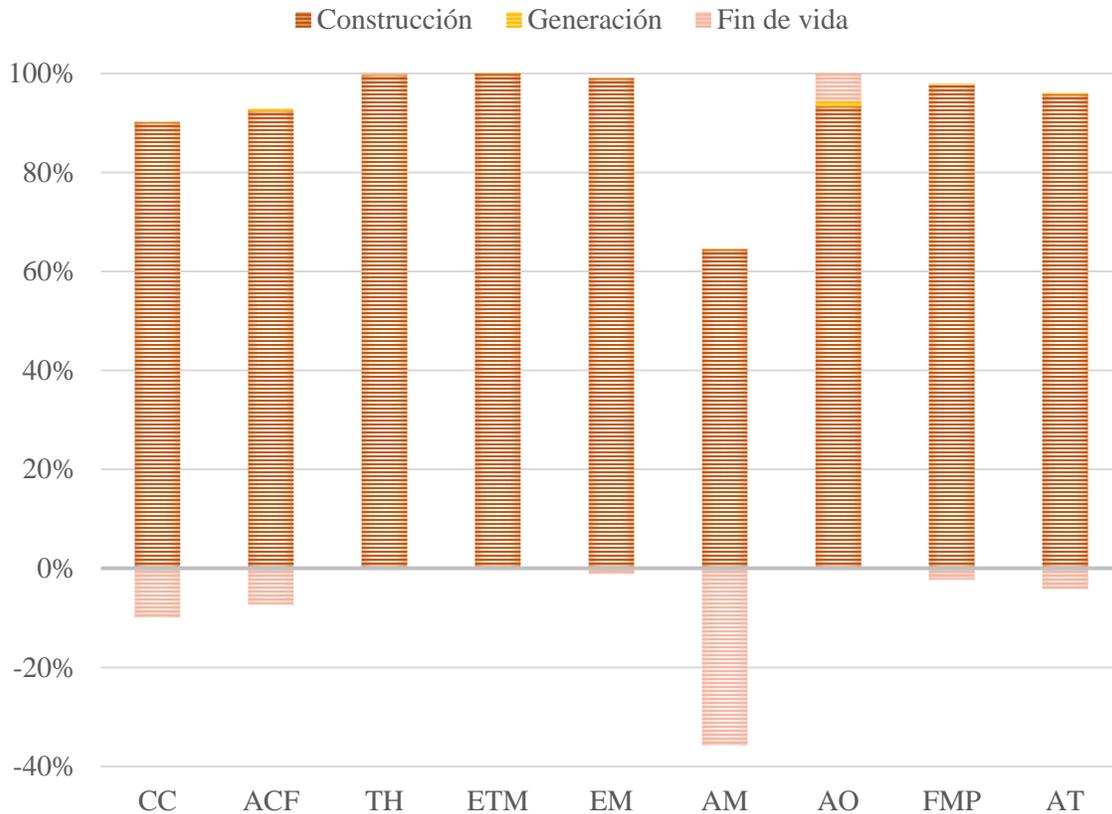
\* Por dispositivo, pero se evaluó una planta de 20 MW.

CC: Cambio Climático. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. AT: Acidificación Terrestre. EM: Eutrofización Marina. TH: Toxicidad Humana. FMP: Formación de Material Particulado. ETM: Eco-Toxicidad Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles.

En la Tabla 24, se puede observar que los impactos ambientales del dispositivo presentado en este trabajo están por arriba de los reportados por otros estudios. Es importante mencionar que existen diferentes factores que influyen en los resultados, al igual que como se mencionaba en el caso del aerogenerador, como lo son la potencia nominal del dispositivo, así como si se trata de un solo dispositivo generador o de un arreglo de más de uno (una granja) como se puede observar en el caso Dahlsten (2009) y Uihlen (2016) donde la potencia nominal del primero es mucho más pequeña que el segundo y sus impacto mucho menores, sin embargo, esto se explica puesto que el estudio presentado por Dahlsten (2009) corresponde a los impactos generados de un dispositivo instalado en una granja de 20 MW mientras que Uihlen (2016) presenta la generación de un solo dispositivo.

En la categoría de cambio climático se puede observar que el presente estudio tiene un impacto mayor al obtenido por Dalton et al. (2014), con quienes tiene mayor similitud por el tipo de dispositivo y la potencia nominal. Esta diferencia se puede deber, como ya se ha mencionado a la potencia nominal, pero también al tipo de materiales requeridos y contabilizados en el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) puesto que en esta categoría de impacto las emisiones de GEI están determinadas por los materiales principalmente (Barnejee et al., 2013).

A continuación, en la Figura 31 se presentan los resultados de la EICV de cada una de las etapas que integran el ciclo de vida de la Boya con Brazo, en ella se puede observar que en todas las categorías de impacto la etapa de construcción es la que mayor contribución, mientras que la generación es aquella donde los impactos son mínimos. Este resultado era de esperarse, puesto que diversos autores han reportado que para los dispositivos de energía undimotriz la construcción es la etapa más relevante en términos de impactos ambientales mientras que la generación, al tratarse de sistemas bajos en carbono y de cero emisiones durante la producción de electricidad, tiene impactos mínimos (Parker et al., 2007; Dahlsten, 2009; Thomson et al., 2011; Zhai et al., 2018; Paredes et al., 2019; Thomson et al., 2019).

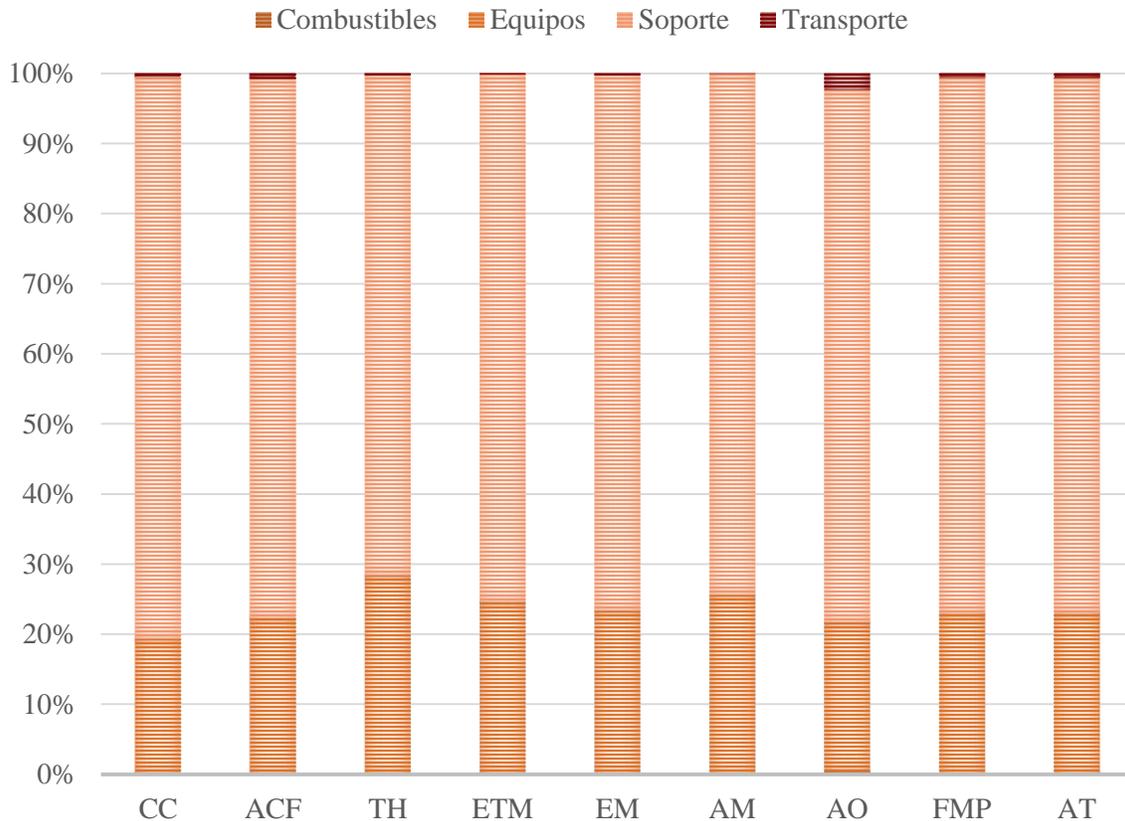


**Figura 31: EICV Brazo con Boya.**

CC: Cambio Climático. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles. TH: Toxicidad Humana. ETM: Eco-Toxicidad Marina. EM: Eutrofización Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. FMP: Formación de Material Particulado. AT: Acidificación Terrestre.

De igual forma, en la Figura 31 se puede observar que en la etapa de Fin de Vida existe una reducción de los impactos ambientales en seis de las nueve categorías estudiadas. Lo anterior se debe a la alta tasa de reciclaje de materiales ferrosos, mayormente al reciclaje del acero el cual es el principal material utilizado a lo largo del ciclo de vida del dispositivo. Esta reducción de los impactos debido al reciclaje es congruente con otros estudios (Parker et al., 2007; Thomson et al., 2019), sin embargo, podría haber una mayor reducción de estos sí los materiales reciclados sustituyeran a los materiales vírgenes en los productos subsiguientes, de manera que al reducirse el uso de energía y el consumo de materias primas se mejoraría la calidad ambiental (Dahlesten, 2009).

La Figura 32, muestra los impactos ambientales resultantes de cada una de las sub-etapas que integran la construcción del dispositivo undimotriz. Se observa que el soporte, el cual está integrado por la cimentación del dispositivo en el lecho marino y la estructura del muelle, es la sub-etapa que mayor contribución aporta entre un 71 hasta un 80% de los impactos en cada una de las categorías estudiadas y dichos porcentajes que son congruentes lo presentado por Patrizi et al., (2019). Estos impactos se deben principalmente a las grandes cantidades de acero que se requieren para sostener dichas edificaciones y es un hecho bien identificado en otros estudios de ACV de energía undimotriz (Thomson et al., 2011; Zhai et al., 2018; Karan et al., 2019). En el caso de estudio, los impactos por el consumo de acero para la estructura de soporte, representan el 76% de los impactos generados por los distintos materiales en todas las categorías de impacto.



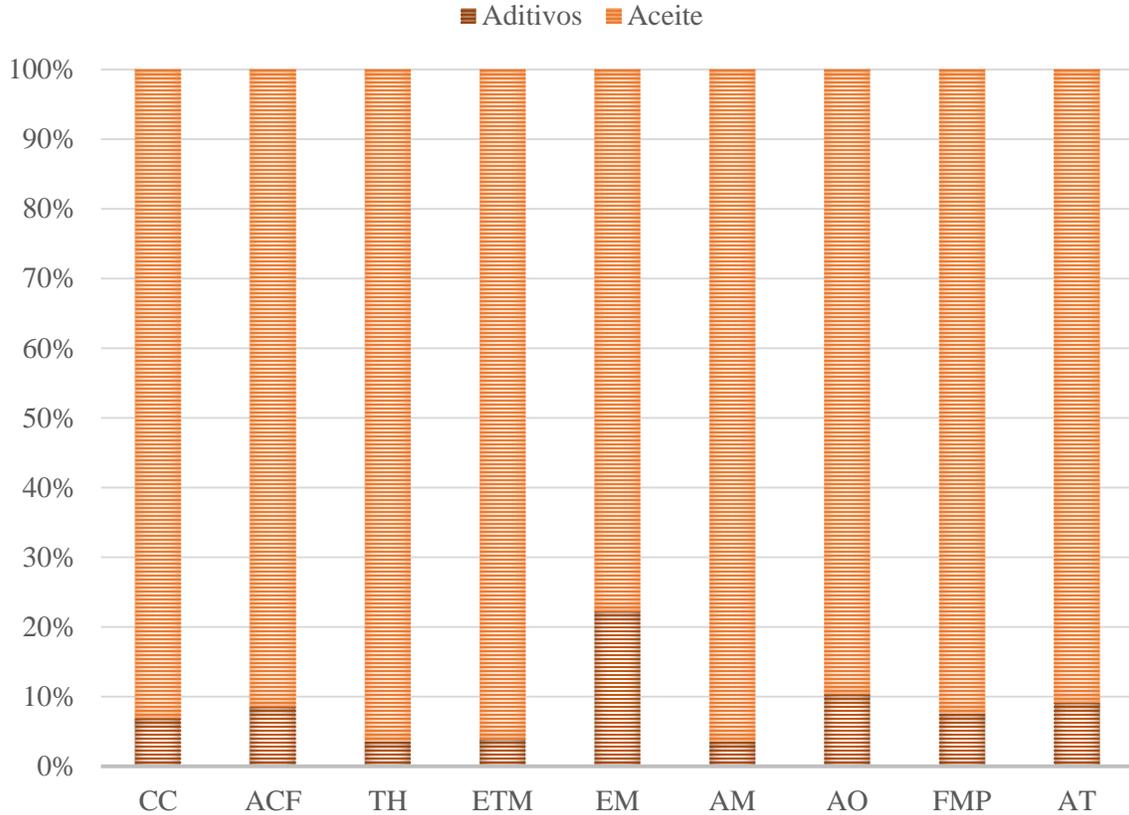
**Figura 32:** EICV Etapa de Construcción Brazo con Boya.

CC: Cambio Climático. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles. TH: Toxicidad Humana. ETM: Eco-Toxicidad Marina. EM: Eutrofización Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. FMP: Formación de Material Particulado. AT: Acidificación Terrestre.

Seguidamente de la sub-etapa de Soporte, la sub-etapa de Equipos, que incluye todos los componentes necesarios para integrar los sistemas de captación, conversión y generación de la energía, es la que mayores impactos genera, los cuales varían de entre un 19.3 hasta un 28.3 por ciento en las diferentes categorías. Para esta sub-etapa, el sistema de conversión es en todas las categorías de impacto el que mayor contribución tiene con entre el 71 y 94% de los impactos, debido a que consta de un mayor número de componentes de los cuales el acero es el material principal requerido para su fabricación.

Por otra parte, los combustibles requeridos para la instalación del dispositivo en el sitio, así como su transporte representan en su conjunto entre el 0.08 y el 2.70 por ciento de los impactos de esta etapa, siendo en la categoría de agotamiento de la capa de ozono (AO) donde mayor contribución tienen debido al uso de camiones de carga para el transporte terrestre del dispositivo desde el sitio de fabricación (Ciudad de Querétaro) hasta su instalación (Ensenada, Baja California).

En la Figura 33, se puede observar los impactos generados durante la sub-etapa de Mantenimiento los cuales representan el 100% dentro de la etapa de Generación, lo anterior debido a que durante la sub-etapa de operación el dispositivo no genera impactos.

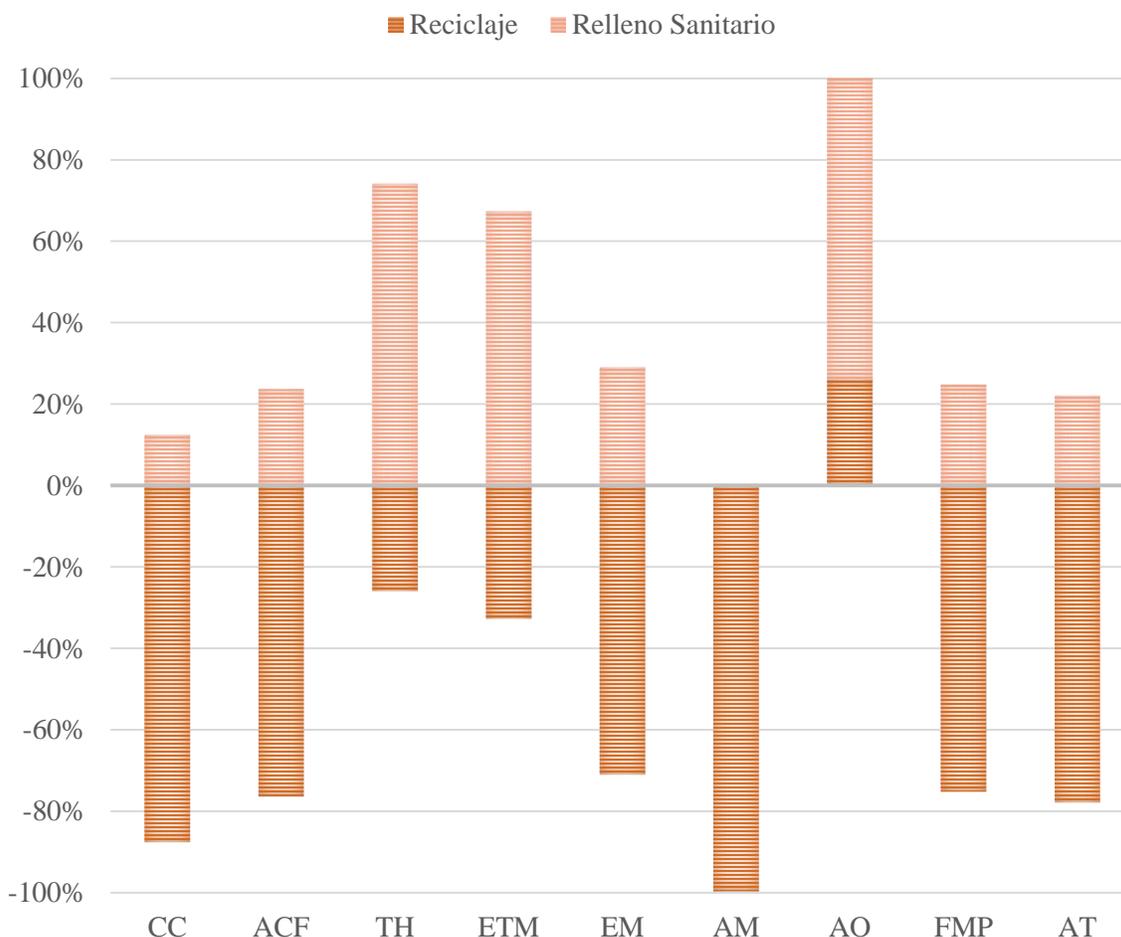


**Figura 33:** EICV Sub-etapa de Mantenimiento Brazo con Boya.

CC: Cambio Climático. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles. TH: Toxicidad Humana. ETM: Eco-Toxicidad Marina. EM: Eutrofización Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. FMP: Formación de Material Particulado. AT: Acidificación Terrestre.

En todas las categorías de impacto el uso del aceite es el insumo que mayores impactos genera. Esto se debe a que el aceite es necesario en una cantidad mayor que el aditivo, ya que este primero es necesario para el correcto funcionamiento del dispositivo mientras que el aditivo es solamente se utilizado para mejorar la calidad y rendimiento del primero, por lo que se requiere menos cantidad. Sin embargo, en la categoría de Eutrofización Marina (EM) su uso representa el 22 por ciento de los impactos, mientras que en las otras categorías no rebasa el 10%.

La Figura 34, muestra los impactos ambientales resultantes de la etapa de Fin de Vida donde se tienen dos escenarios de disposición final: Reciclaje y el Relleno Sanitario. Se asumió la tasa de reciclaje del 90% para materiales ferrosos, tal como se mencionó anteriormente, debido a que es lo más común para sistemas que evalúan el desempeño de energías renovables (Karan et al., 2019; Parker et al., 2007; Dalton et al., 2014; Zhai et al., 2018; Thomson et al., 2019) y que en este estudio se trata de acero, aluminio y hierro, mientras que el resto de los materiales ferrosos y no ferrosos utilizados son los que componen el escenario de relleno sanitario (acero, aluminio, hierro y concreto).



**Figura 34:** EICV Etapa de Fin de Vida Brazo con Boya. CC: Cambio Climático. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles. TH: Toxicidad Humana. ETM: Eco-Toxicidad Marina. EM: Eutrofización Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. FMP: Formación de Material Particulado. AT: Acidificación Terrestre.

Como se puede observar en la Figura 34, para la mayoría de las categorías de impacto el escenario de reciclaje representa una mejora ambiental pues la correcta disposición de estos materiales supera los impactos negativos generados por la disposición de los residuos en los rellenos sanitarios, donde el reciclaje del acero es el escenario que mayores beneficios ambientales tiene y lo cual era de suponerse porque se utilizan cantidades mucho más grandes de este respecto al aluminio y el hierro, que solo se ocupa en la fabricación de las válvulas necesarias para el sistema de conversión y para el motor trifásico del sistema de generación, respectivamente. Sin embargo, para la categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono (AO) se observan que no hay créditos a favor del reciclaje.

De los impactos generados por el escenario de relleno sanitario, la disposición final del concreto es el material que mayor contribución aporta a los impactos, esto es debido a la gran cantidad de material que se tiene que se supone permanece en el océano una vez que termina la vida útil del dispositivo, y que se modela de acuerdo a las suposiciones metodológicas expuestas en el apartado 3.2, mientras que la disposición del aluminio en un relleno sanitario es casi insignificante, debido a las pequeñas cantidades que se utilizan a lo largo del ciclo de vida del dispositivo y que se ven aún más reducidas debido a la alta tasa de reciclaje asumida.

### 4.2.1.3. MUTRIKU

Como se menciona en la Tabla 2 (véase apartado 2.1.2), existen diferentes mecanismos para la extracción de energía del océano, donde OWC es uno de ellos y el sistema utilizado por la Planta de Energía Undimotriz en Mutriku, España. La Tabla 25 muestra tanto los resultados de la EICV de esta central eléctrica, así como diferentes autores que han estudiado sistemas de energía undimotriz de este tipo o del tipo overtopping que podría ser el tipo de energía undimotriz más parecido al OWC.

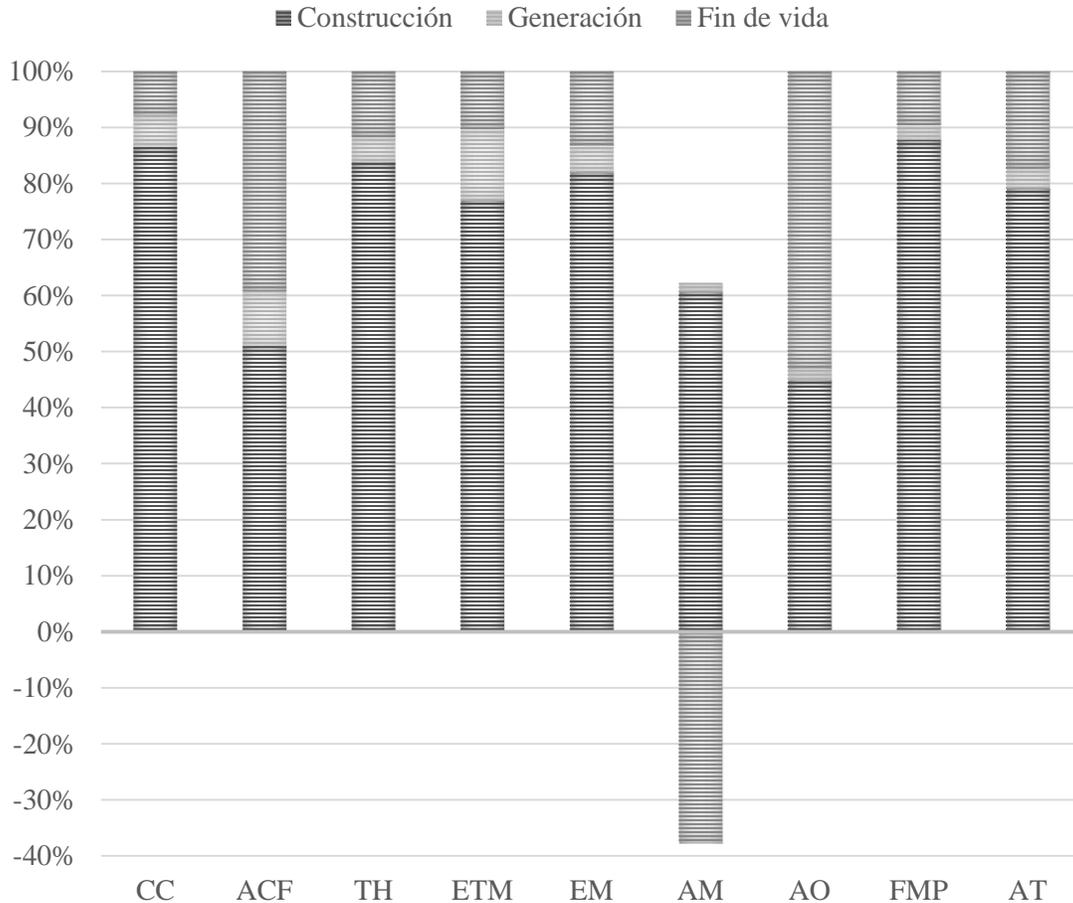
**Tabla 25:** EICV Sistemas de Energía Undimotriz tipo OWC y Overtopping.

Referencia	Dispositivo	Potencia	CC kg CO <sub>2</sub> eq/kWh	AO kg CFC- 11 eq/kWh	AT kg SO <sub>2</sub> /kWh	EM kg N eq/kWh	TH kg 1,4- DBC eq/kWh	FMP kg PM <sub>10</sub> eq/kWh	ETM kg 1,4- DCB eq/kWh	AM kg Fe eq/kWh	ACF kg oil eq/kWh
<b>Este Estudio</b>	OWC	296 kW	2.26E-01	2.11E-08	8.53E-04	4.67E-05	3.95E-02	6.44E-04	1.38E-03	3.21E-03	5.50E-02
<b>Patrizi et al., 2019</b>	OBREC	3 kW	3.70E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Zhai et al., 2018</b>	Buoy rope drum	10 kW	8.90E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Uihlein, 2016</b>	OWC	~528 kW	4.50E-02								
<b>Banerjee et al., 2013</b>	Wave Dragon	7 MW	2.80E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Sørensen et al., 2009</b>	Wave Dragon	-	1.30E-02	-	-	-	-	-	-	-	-

CC: Cambio Climático. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. AT: Acidificación Terrestre. EM: Eutrofización Marina. TH: Toxicidad Humana. FMP: Formación de Material Particulado. ETM: Eco-Toxicidad Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles.

Como ya se ha mencionado, y la Tabla 25 lo confirma, existe una gran laguna en el conocimiento respecto a los impactos ambientales de los dispositivos que generan energía a través de océano, fuera de la evaluación de impacto en la categoría de cambio climático. En esta categoría para los estudios consultados en la bibliografía, los impactos ambientales de Mutriku son ampliamente mayores. Sin embargo, es importante resaltar que el dispositivo analizado por Uihlein (2016), que es el único que utiliza el mismo tipo de extracción de energía del océano, es un diseño conceptual y Mutriku es un sistema que trabaja a escala comercial desde hace ya 10 años. Mientras que el resto de dispositivos, a excepción del Wave Dragon, se encuentran en una etapa de desarrollo en la que apenas se están haciendo pruebas piloto en el medio marino.

A continuación, en la Figura 35 se presentan los resultados de la EICV de cada una de las etapas que integran el ciclo de vida de Mutriku, en ella se puede observar que en todas las categorías de impacto la etapa de construcción es la que mayor contribución, mientras que la generación es aquella donde los impactos son mínimos. Este resultado era de esperarse, puesto que al igual que la “boya con brazo”, Mutriku es una central de energía eléctrica cuya fuente de energía es el oleaje (Garrido et al., 2015; Ibarra et al., 2018; Lekube et al., 2018; Serras et al., 2019), por lo que se trata de una planta de energía baja en carbono durante la etapa de generación (Parker et al., 2007; Dahlsten, 2009; Thomson et al., 2011; Zhai et al., 2018; Paredes et al., 2019; Thomson et al., 2019).

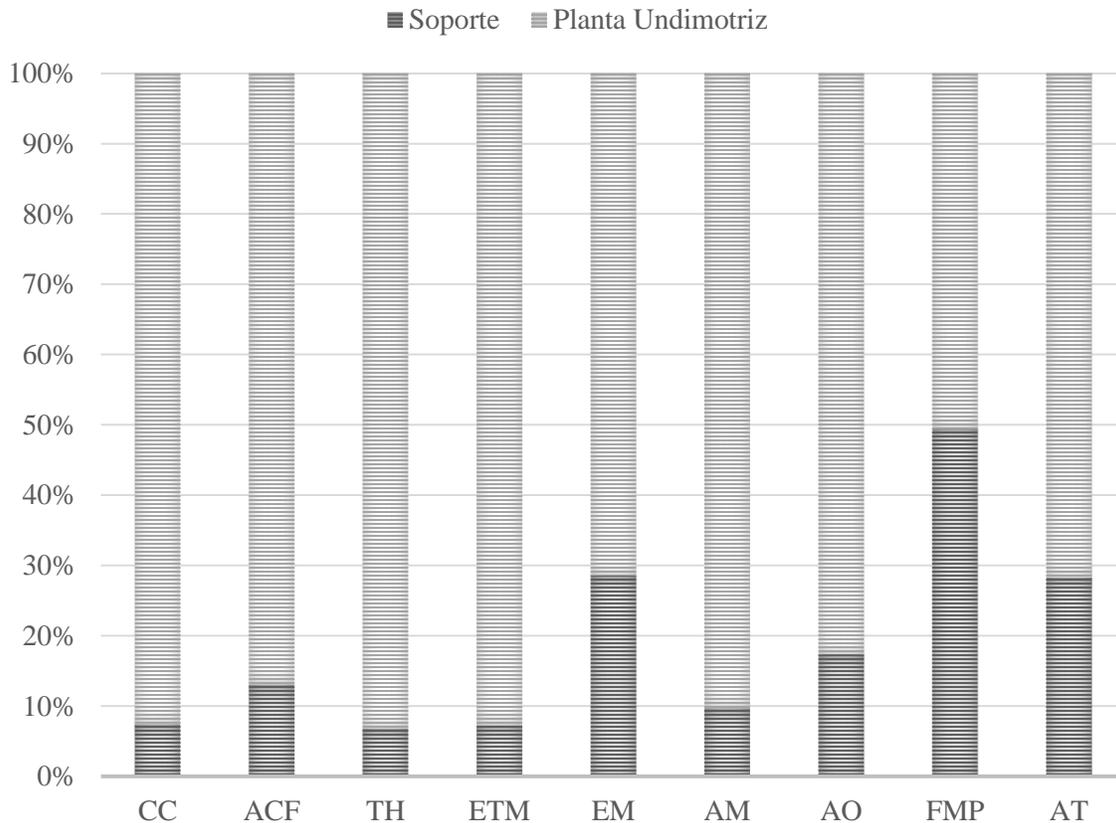


**Figura 35: EICV Mutriku.**

CC: Cambio Climático. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles. TH: Toxicidad Humana. ETM: Eco-Toxicidad Marina. EM: Eutrofización Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. FMP: Formación de Material Particulado. AT: Acidificación Terrestre.

Como se muestra en la Figura 35, tan solo en una de las nueve categorías de impacto hay una reducción del deterioro ambiental debido a la correcta gestión de los residuos (AM: Agotamiento de los Recursos Minerales), mientras que para las categorías de Agotamiento de la Capa de Ozono (AO) y Agotamiento de los Combustibles Fósiles (ACF) son donde mayor impacto generan los escenarios de disposición final planteados para esta etapa en un 53% y 39% respectivamente, dichos resultados serán discutidos con mayor detalle más adelante.

La Figura 36, muestra los impactos ambientales resultantes de cada una de las sub-etapas que integran la construcción del dispositivo undimotriz. Como se puede observar, en todas las categorías de impacto la Planta Undimotriz, es la sub-etapa con mayores impactos. La etapa de Soporte, cuyos impactos varían entre el 7% y el 49% para las diferentes categorías de impacto, esta integrada por el dique de talud, o dique de abrigo constituido por concreto y piedra caliza, y la cimentación (51-93% de los impactos en esta etapa).

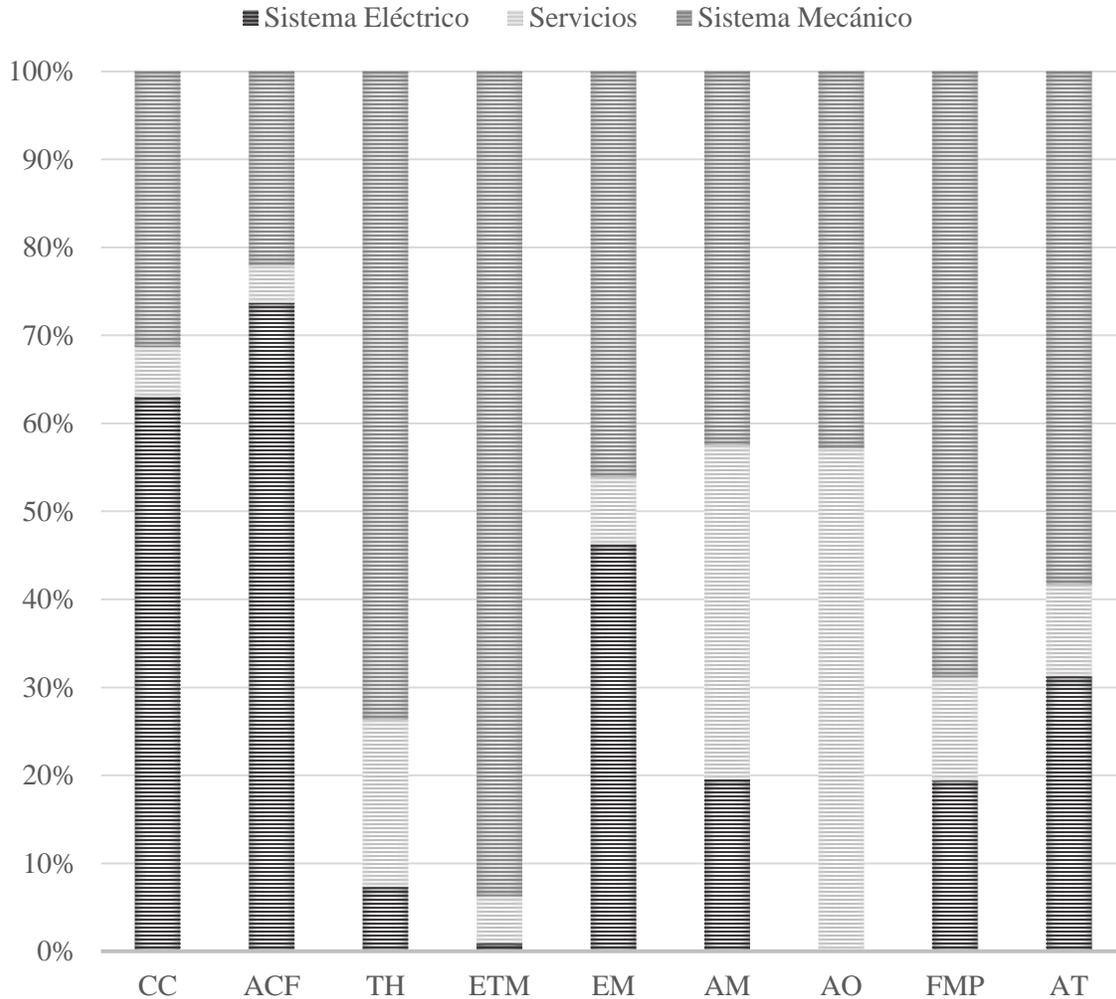


**Figura 36: EICV Etapa de Construcción Mutriku.**

CC: Cambio Climático. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles. TH: Toxicidad Humana. ETM: Eco-Toxicidad Marina. EM: Eutrofización Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. FMP: Formación de Material Particulado. AT: Acidificación Terrestre.

La planta undimotriz, esta integrada por la construcción de las 16 cámaras de aire, la sala de turbinas, la pavimentación y los equipos. Para 7 de las 9 categorías de impacto, las cámaras de aire es la que mayores impactos genera que varían entre el 27% y el 57%, siendo el agotamiento de los minerales la categoría con menor impacto y la formación de material particulado la de mayor contribución. Para las categorías de impacto de agotamiento de los minerales (AM) y ecotoxicidad marina (ETM), la sub-etapa de Equipos, que incluye la manufactura de los diferentes elementos y componentes que integran el dispositivo, es mayor que el de las cámaras de aire y se debe a el consumo de acero requerido para ello.

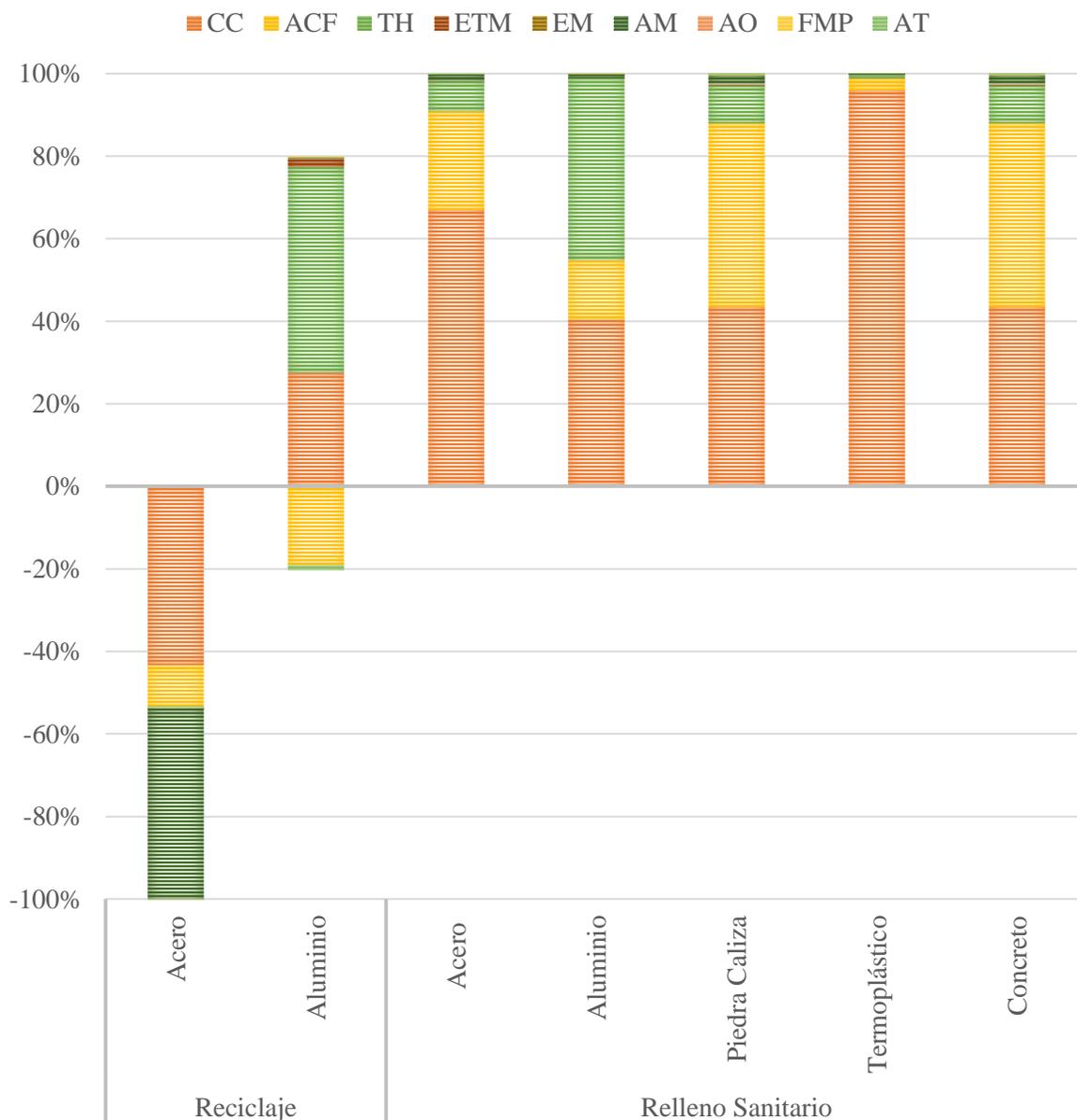
En la Figura 37, se puede observar que los impactos generados durante la sub-etapa de Mantenimiento los cuales representan el 100% dentro de la etapa de Generación, lo anterior debido a que durante la sub-etapa de operación el dispositivo no genera impactos asociados, debido a que para la producción de electricidad no requiere insumos y/o materias primas. En mayoría de las categorías de impacto, exceptuando de cambio climático (CC), agotamiento de los combustibles fósiles (ACF), agotamiento de la capa de ozono (AO) y eutrofización marina (EM), el mantenimiento del sistema mecánico, el cual incluye la aplicación de lubricante, el cambio de los rodamientos y rodets, es la sub-etapa con mayores impactos asociados al mantenimiento de Mutriku.



**Figura 37:** EICV Sub-etapa de Mantenimiento.

CC: Cambio Climático. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles. TH: Toxicidad Humana. ETM: Eco-Toxicidad Marina. EM: Eutrofización Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. FMP: Formación de Material Particulado. AT: Acidificación Terrestre.

La Figura 38, muestra los impactos ambientales resultantes de la etapa de Fin de Vida donde se tienen dos escenarios de disposición final: Reciclaje y el Relleno Sanitario, así como los materiales que se disponen en cada uno de ellos. Se asumió la tasa de reciclaje del 90% para materiales ferrosos, tal como se mencionó anteriormente, debido a que es lo más común para sistemas que evalúan el desempeño de energías renovables (Karan et al., 2019; Parker et al., 2007; Dalton et al., 2014; Zhai et al., 2018; Thomson et al., 2019).



**Figura 38:** EICV Etapa de Fin de Vida. CC: Cambio Climático. ACF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles. TH: Toxicidad Humana. ETM: Eco-Toxicidad Marina. EM: Eutrofización Marina. AM: Agotamiento de los Recursos Minerales. AO: Agotamiento de la Capa de Ozono. FMP: Formación de Material Particulado. AT: Acidificación Terrestre.

De la Figura 38, se puede observar que los impactos evitados debido a la correcta gestión de materiales metálicos utilizados a lo largo del ciclo de vida de Mutriku, son mayormente por el reciclaje del acero, mientras que en el caso del aluminio el reciclaje tiene impactos ambientales en la mayoría de las categorías de impacto analizadas, las cuales son: cambio climático (CC), toxicidad humana (TH), ecotoxicidad marina (ETM), agotamiento de los recursos minerales (AM) y formación de material particulado (FMP). Esto se debe principalmente al uso de energía eléctrica en las plantas de reciclaje, puesto que generalmente el mix energético está abastecido en gran parte por combustibles fósiles (Grimaud et al., 2016).

## 4.2.2. EVALUACIÓN DE IMPACTO POR CATEGORÍA

### 4.2.2.1. CAMBIO CLIMÁTICO (CC)

Las tecnologías de generación de energía a través de fuentes renovables son consideradas como limpias en lo que respecta a la generación de emisiones GEI, sin embargo, esto no significa que sean nulas, como generalmente se supone al evaluar los créditos de carbono (Bhat y Prakash, 2009).

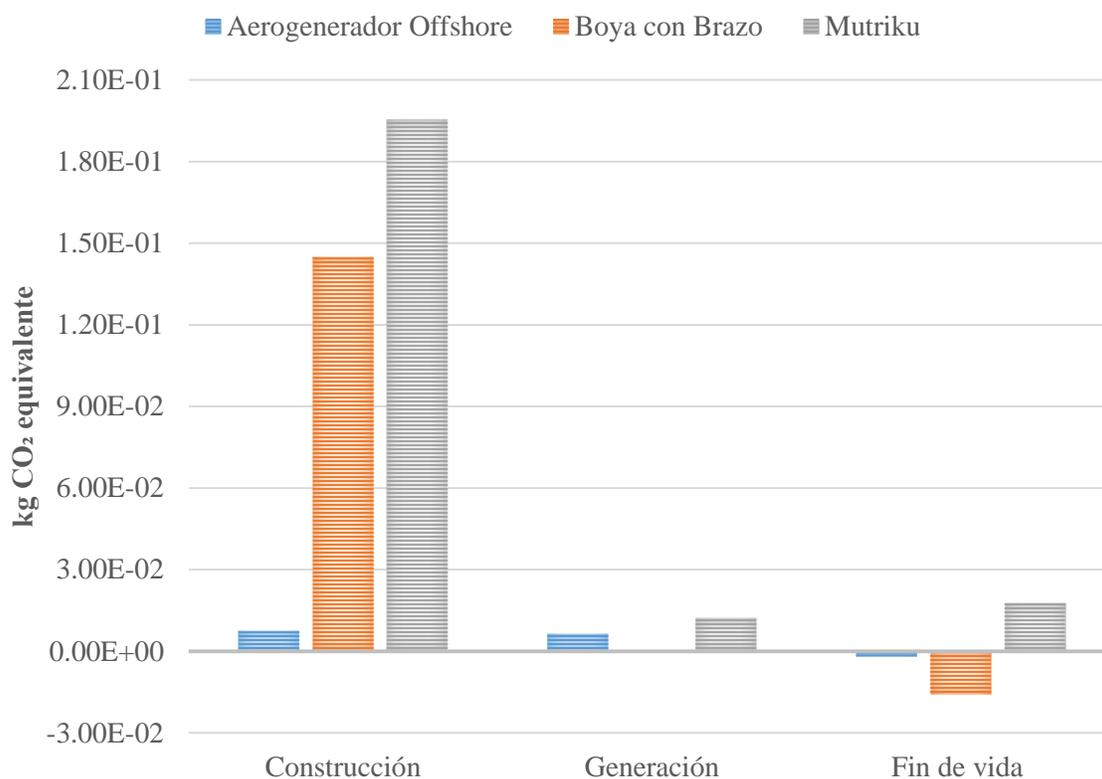
La Figura 39, muestra los impactos generados por cada una de las tecnologías estudiadas en sus tres etapas para la categoría de cambio climático cuyas unidades son los kg de CO<sub>2</sub> equivalente por unidad funcional (kWh).

Los impactos generados en esta categoría para el aerogenerador offshore son de 7.29E-03, 6.31E-03 y -1.76E-03 kg CO<sub>2</sub> equivalente para las etapas de construcción, generación y fin de vida respectivamente, estos valores representan el 62% de los impactos para la etapa de construcción, 53% en la generación, mientras que los impactos evitados son del 15% debido a la gestión de los residuos durante el fin de vida.

Los impactos asociados a la etapa de construcción, del aerogenerador offshore, reportados en la literatura son de entre el 60 hasta el 80%, siendo la estructura de soporte la sub-etapa con mayor contribución (Bonou et al., 2016; Huang et al., 2017; Kaldellis y Apostolou, 2017; Yang et al., 2018), coincidiendo con los resultados obtenidos en este estudio. Los impactos durante la fase de construcción se distribuyen en las sub-etapas que lo componen de la siguiente manera: el 55.93% se debe a la estructura de soporte, la cual está compuesta en un 61% por los impactos asociados a la cimentación y en un 39% por el acero de la torre que sostiene la turbina. La manufactura de los equipos ocupa el segundo lugar de los impactos asociados a la fase de construcción con el 38.83%, donde el rotor y todos los componentes que lo integran (buje, eje principal, nariz del cono y las palas del rotor) es el equipo que mayores impactos genera (73.17%), seguido de los combustibles requeridos durante la instalación del dispositivo (3.66%), mientras que el cable sub-marino son el 1.53% de los impactos y el transporte representa tan solo el 0.05% de la fase de construcción.

Para el aerogenerador offshore, en su fase de generación representan 53% de los impactos totales de esta categoría, el uso del lubricante necesario para el funcionamiento de la turbina tiene el porcentaje más alto de impactos asociados (83%), seguido de las palas del rotor (9%) que se requieren fabricar para cambiar una vez a lo largo de la vida útil del aerogenerador.

El impacto evitado por la disposición final de los residuos es ligeramente inferior al reportado por Berrios et al. (2009) quienes estimaron que se reducen en un 17%, mientras que en este estudio se tiene una reducción de los impactos del 15%. Los impactos evitados se deben a los escenarios de reciclaje de metales (acero, hierro, cobre) así como de los cables.



**Figura 39:** Categoría de Impacto de Cambio Climático para los sistemas evaluados.

Por otro lado, los impactos en esta categoría para el sistema de la Boya con Brazo son de  $1.27E-01$  kg CO<sub>2</sub> por kWh distribuido en sus etapas de construcción, generación y fin de vida son como  $1.45E-01$ ,  $1.68E-04$ ,  $-1.58E-02$  kg de CO<sub>2</sub> respectivamente.

Los impactos de la construcción son en un 80% por el soporte del dispositivo, los cuales se distribuyen en los impactos asociados a la cimentación (98.5%) y la estructura del muelle (1.5%). La cimentación se compone de los impactos asociados a los diversos materiales necesarios para su construcción donde el acero representa el 78.6% de estos impactos, seguido del cemento (21.38%), siendo los dos elementos más importantes, puesto que la grava, la arena y el agua requerida en su conjunto son tan solo el 0.0163% de los impactos. Por otro lado, el 1.5% de los impactos asociados a la estructura del muelle se deben en su mayoría al cemento requerido (99%) y el 1% restante se reparte entre la grava, la arena y el agua utilizados.

A pesar de que los impactos en la etapa de generación de la boya con brazo sean tan pequeños comparados con los del aerogenerador y por ello no se aprecien en la Figura 39, estos existen y son en un 93% debido al uso del aceite.

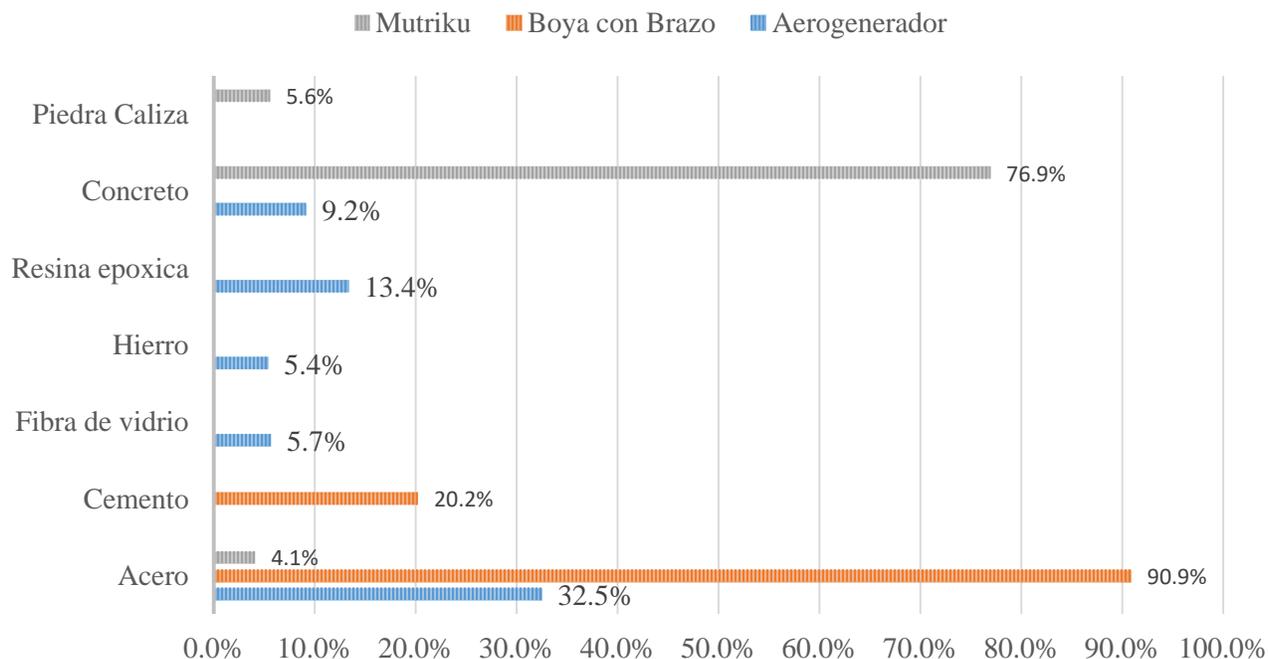
Para la etapa de fin de vida, los impactos que se generan son debidos a la disposición en relleno sanitario de los materiales, principalmente del concreto, sin embargo, estos son pocos y se reducen debido al reciclaje de los materiales ferrosos especialmente al acero, ya que la masa de aluminio y hierro, son muy pequeñas comparada con las grandes cantidades de acero que se utilizan en la fabricación de los diferentes equipos y el soporte del dispositivo.

En lo que respecta a Mutriku, para esta categoría de impacto, los impactos globales son de 2.26E-01 kg CO<sub>2</sub> equivalente, repartidos en sus tres etapas como: 1.95E-01 kg CO<sub>2</sub> equivalente para la construcción, 1.24E-02 kg CO<sub>2</sub> equivalente durante la generación y de 1.79E-02 kg CO<sub>2</sub> equivalente para el fin de vida, tal como se puede observar en la Figura 39. Al igual que para los otros dispositivos, la etapa de construcción es la que mayores impactos tiene sobre el impacto global con un 87%, seguido por el fin de vida (8%), mientras que la generación es la etapa con menos impactos asociados con el 5%.

En la etapa de construcción, Mutriku, tiene dos sub-etapas: el soporte y la planta undimotriz, tal como se describe en el apartado 3.1.3.3, donde los impactos son del 8% y 92% respectivamente. La sub-etapa de “Planta Undimotriz” esta compuesta por todos los materiales e insumos que se requieren para la construcción de las cámaras de aire, sala de turbinas, pavimentación y los equipos. Los porcentajes de impacto son: 39% cámaras de aire, 35% sala de turbinas, 22% pavimentación y el 5% equipos. En todos los casos la mayoría de los impactos están asociados al consumo de concreto, puesto que es el material que se cuantifico en mayor cantidad.

En lo que respecta al mantenimiento de la Planta de Energía Undimotriz de Mutriku, los impactos están distribuidos en las sub-etapas de la siguiente forma: 63% mantenimiento del sistema eléctrico, donde estos impactos se asocian directamente al consumo de termoplastico necesario para la fabricación de los ventiladores, 31% de los impactos se deben al mantenimiento del sistema mecánico, donde los rodetes necesarios para el correcto funcionamiento de los equipos implica el 98% de estos impactos, y el 6% restante del mantenimiento es debido al consumo de agua, la cual tiene diferentes funciones dentro del sistema puesto que se usa tanto para cubrir los servicios básicos del sitio (limpieza, suministro de agua, etc) así como la limpieza de las turbinas tipo Wells.

Como ya se mencionó, el uso de distintos materiales utilizados a lo largo del ciclo de vida de los diferentes sistemas de generación de energía tiene una relevancia sobre los impactos asociados. La Figura 40, muestra los materiales con porcentajes de contribución a los impactos de cada sistema.



**Figura 40:** Impactos en la categoría de cambio climático de los sistemas de generación de energía oceánica debido a los materiales.

En el caso del aerogenerador los materiales utilizados a lo largo de su ciclo de vida, específicamente en sus etapas de construcción y operación, representan el 68% de los impactos globales. El acero requerido para la construcción y mantenimiento del aerogenerador es el material que mayores contribuciones aporta al deterioro ambiental (35.5%), lo que coincide con otros estudios que afirman que la mayoría de las emisiones de GEI se liberan debido a los procesos asociados al consumo de acero (Reimers et al., 2014; Huang et al., 2017; Yang et al., 2018) y otros materiales ferrosos como el hierro (Wiedmann et al., 2011).

Por otra parte, en la Figura 40, los materiales utilizados a lo largo del ciclo de vida del sistema de brazo con boya que se excluyen debido a su baja contribución a esta categoría de impacto son: arena (0.0014%), grava (0.0006%), agua (0.0133%), aluminio (0.0013%), termoplástico (0.0001%) y hierro (0.0025%). El acero es el elemento con mayores impactos asociados seguido del cemento necesario, con el 90.8% y el 20.2% respectivamente.

En el caso de Mutriku, el consumo de los diferentes materiales representa el 92% de los impactos globales, en esta categoría de impacto. En la Figura 40, solo se incluyeron los impactos asociados al consumo de acero, concreto y piedra caliza, que en conjunto representan el 86.6% de los impactos ambientales derivados de los diferentes materiales utilizados a lo largo del ciclo de vida de la planta undimotriz, siendo el concreto el mayor contribuyente (76.9%). El 13.4% restante esta repartido en el resto de los materiales e insumos: termoplástico, aluminio, magnesio, agua y lubricante.

Las emisiones de GEI asociadas a la cadena de producción del acero, se deben de forma directa a las grandes cantidades de energía que se requieren para la transformación del mineral y que en su mayoría se abastecen a través de la quema de combustibles fósiles, mientras que las emisiones indirectas se relacionan con el consumo de coque, gas y la demanda de energía eléctrica (Burchart, 2013; Olmez et al., 2016).

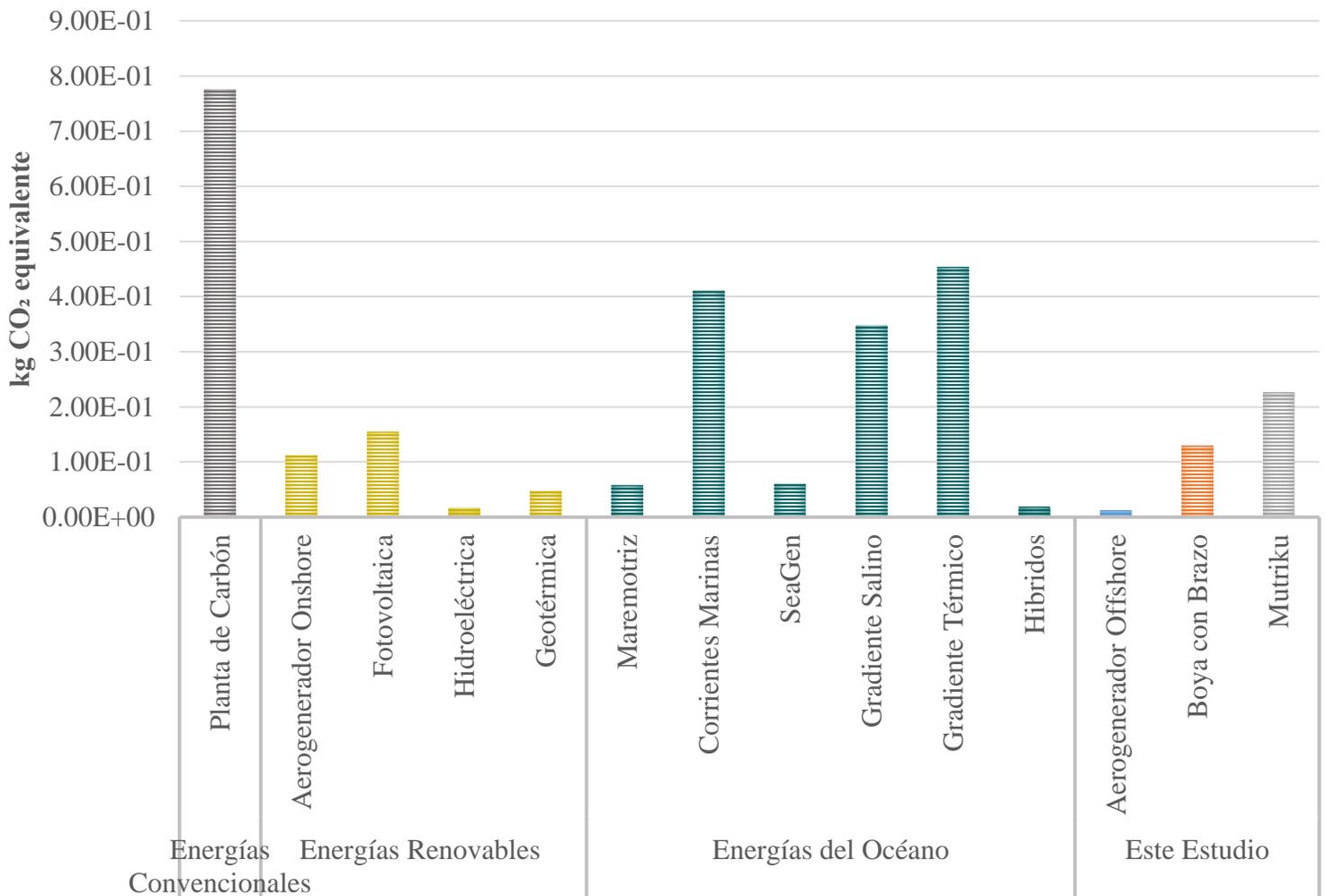
Por otra parte, la industria del cemento, debido a las grandes cantidades de materias primas y energía que se requieren, es una fuente preocupante de impactos ambientales. Las emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción de cemento, y por lo tanto asociadas al consumo de concreto se deben principalmente a los hidrocarburos clorados o bromados emitidos a lo largo de la producción de combustibles fósiles, la extracción de materias primas y la demanda energética, tanto de energía calorífica como eléctrica (Stafford et al., 2016).

Como se puede observar en la Figura 40, el acero es un material cuyos impactos asociados disminuye el rendimiento ambiental de las tecnologías de extracción de energía oceánica, a pesar de las diferencias que estas pudieran tener en tamaño como en método de extracción de la energía (Karan et al., 2019; Paredes et al., 2019), lo cual reitera que la reducción de las necesidades de acero por unidad funcional o el uso de materiales podrían ayudar a incrementar el rendimiento ambiental de este tipo de tecnologías.

Sin embargo, y a pesar de que es bien sabido que, para los dispositivos undimotrices, así como para los aerogeneradores offshore, el acero es el material con mayores aportaciones, no hay que minimizar la relevancia del uso de concreto. Danhlsten (2009) proponen que este puede ser una alternativa al uso del acero, puesto que, aunque representa un alto costo económico, ya que el impacto es menor que utilizar, de manera que se disminuye el impacto global. Además, es importante resaltar que hoy en día existen estudios en el área de la ingeniería ecológica que buscan mejorar el valor ecológico de las estructuras artificiales, principalmente aquellas que se encuentran en el medio marino. Particularmente el concreto “verde”, fabricado con subproductos industriales reciclados lo que mejora

su huella ambiental, hace que las estructuras sean más adecuadas para que la biodiversidad marina las colonice (Dennis et al., 2018).

A pesar, de los impactos ambientales generados por cada uno de los dispositivos presentados en este trabajo y sus implicaciones, estos siguen teniendo un mejor rendimiento ambiental con respecto a las fuentes convencionales de energía e incluso frente a otras fuentes de energía renovable convencional y oceánica. Lo anterior se puede comprobar al observar la Figura 41, la cual presenta una comparación de los valores promedio de la producción de 1kWh por medio de distintas tecnologías de generación de energía a través de fuentes renovables: (1) aerogenerador onshore o terrestre (Pehnt, 2006; Rule et al., 2009; Nugent y Sovacool, 2014; Ji y Chen, 2016; Cortés et al., 2019; Lundie et al., 2019; Li et al., 2020), (2) fotovoltaica (Pehnt, 2006; Nugent y Sovacool, 2014), hidroeléctrica (Pehnt, 2006; Rule et al., 2019), (3) geotérmica (Pehnt, 2006; Rule et al., 2009), (4) maremotriz (Rule et al., 2009; Elmehag y Torosian, 2013; Simon, 2015; Walker et al., 2015), (5) gradiente térmico (Banerjee et al., 2013; Aalbers, 2015; Zamorano, 2019), (6) corrientes marinas (Zamorano, 2019), gradiente salino (Zamorano, 2019), (7) SeaGen (Douglas et al., 2008; Walker y Howell, 2011; Uihlein, 2015; Zamorano, 2019), (8) de una tecnología híbrida entre un sistema de energía oceánica y eólica marino (Elginoy y Bas, 2017), (9) así como una planta de energía convencional a base de quema de carbón (Li et al., 2020).



**Figura 41:** Impactos en la categoría de cambio climático de distintos sistemas de generación de energía.

En la Figura 41, a pesar de la incertidumbre que se tiene al no hacer distinción entre los diferentes factores que afectan el desempeño ambiental, tanto a nivel metodológico, como lo son la definición de los límites del sistema y el detalle con el que se realiza el inventario de ciclo de vida (Pennoch et al., 2021), como a nivel técnico: la tecnología seleccionada, el sitio de instalación, factor de capacidad, la potencia nominal, entre otros (Pehnt, 2006; Rule et al., 2019; Uihlein, 2016; Paredes et al., 2019; Pennoch et al., 2021), de las diversas tecnologías de generación de energía a través de fuentes renovables, se puede observar que todas ellas tienen considerablemente menores emisiones de GEI, de entre el 42 hasta el 98% menos, que una planta de generación convencional a través de la quema de carbón. De esta forma se reafirma lo que otros autores han concluido: los sistemas de generación de energía a través de fuentes renovables, son sistemas bajos en carbono, por lo que al utilizarlos se puede mitigar el cambio climático (Parker et al., 2007; Dahlsten, 2009; Esteban et al., 2011; Panwar et al., 2011; Thomson et al., 2011; Esteban y Leary, 2012; Zhai et al., 2018; Paredes et al., 2019; Thomson et al., 2019).

Dentro de los diferentes dispositivos de generación de energía por fuentes renovables convencionales, se puede observar (Figura 41), la hidroeléctrica es la que mejor rendimiento ambiental tiene ( $1.61E-02$  kg CO<sub>2</sub> equivalente), seguido de la energía geotérmica ( $4.66E-02$  kg CO<sub>2</sub> equivalente), eólica terrestre ( $1.13E-01$  kg CO<sub>2</sub> equivalente) y por último la energía fotovoltaica ( $1.54E-01$  kg CO<sub>2</sub> equivalente). En el caso de la energía hidroeléctrica, Bhat y Prakash (2009) reportan que los esquemas pequeños, en los que no hay almacenamiento de agua, son aquellos que tienen menor impacto ambiental, pero como se ha mencionado anteriormente, depende del sitio de instalación (Bhat y Prakash, 2009).

Como se mencionó, dentro de las energías renovables la energía hidráulica, la energía eólica terrestre y la energía solar son las formas con mayor capacidad de generación instalada alrededor del mundo (IRENA, 2020), lo que se traduce como las industrias de extracción de energía renovables más consolidadas, razón por la cual tienen un rendimiento ambiental considerablemente mejor que las energías del océano presentadas tanto en este estudio como las reportadas en la literatura (Apolonia y Simas, 2021).

Existen diferentes retos importantes en los sistemas de generación de energía oceánica para que puedan ser comparados de manera justa con conjuntos a gran escala como lo son las energías renovables convencionales (solar, eólica, hidráulica y geotérmica). Uno de los más representativos es que los proyectos de energía renovable en los océanos generalmente evalúan dispositivos individuales, diseñados y construidos específicamente para la demostración de la tecnología y no despliegues de generación a nivel comercial, lo que disminuye su desempeño ambiental al no compartir componentes dentro del balance de una planta (Pennoch et al., 2021).

Por otra parte, también existe el reto de comparación entre diferentes formas de extracción de la energía marina (undimotriz, maremotriz, gradiente térmico, gradiente salino, corrientes). Uno de ellos es debido a la amplia variedad en diseño, opciones de dimensiones y nivel de desarrollo de los diferentes dispositivos (Douziech et al., 2016; Paredes et al., 2019). Así mismo, la amplia gama de supuestos para representar las operaciones marinas que se pueden encontrar en los diversos estudios de ACV de energías del océano, aumenta la incertidumbre de los datos y dificulta la comparación (Apolonia y Simas, 2021; Pennoch et al., 2021).

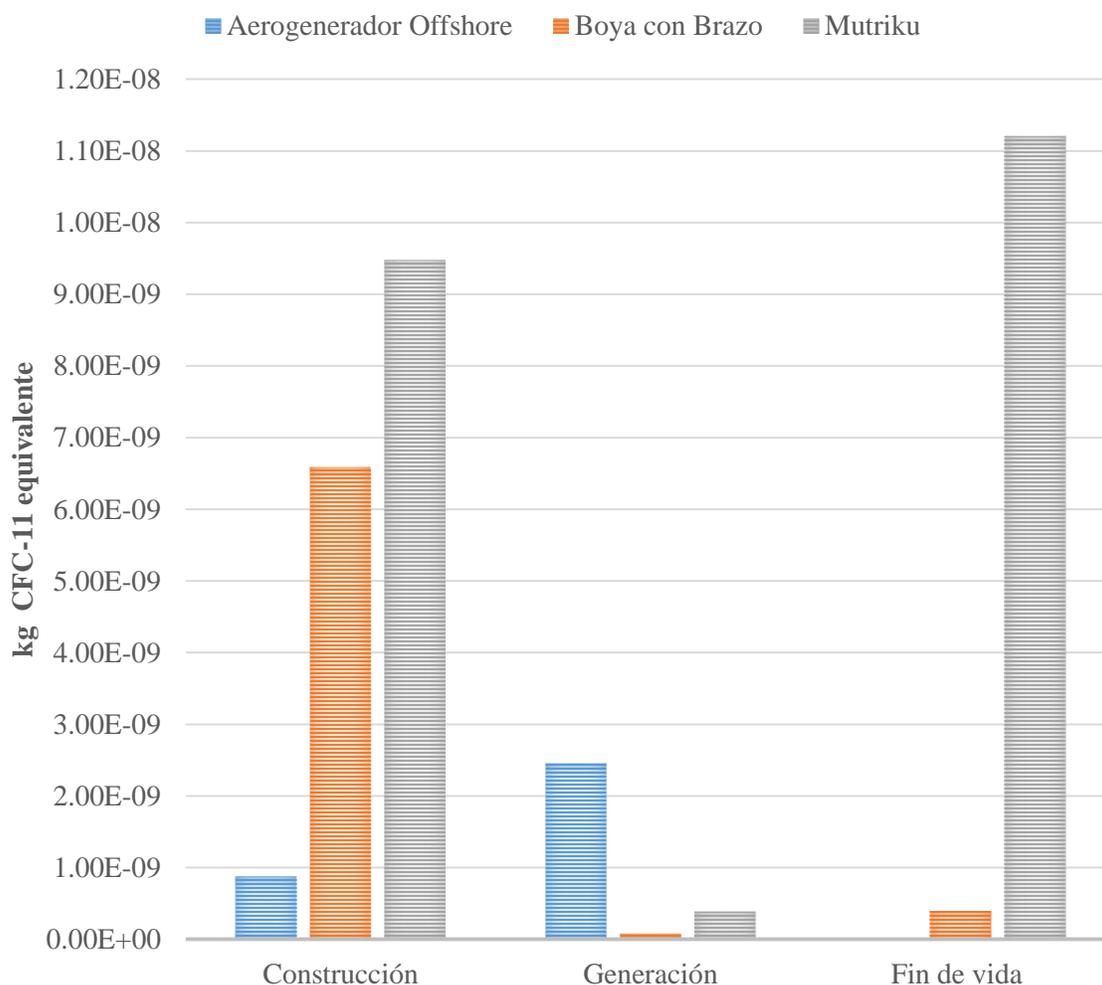
A pesar de todos estos retos, en este trabajo se pretende mostrar que las tecnologías de extracción de energía presentadas en este estudio son una oportunidad interesante para nuestro país, de manera que pueden ayudar a la transición energética, a ir construyendo una economía baja en carbono, ya que tienen una emisión de GEI menor que otras tecnologías de generación del océano y un buen

rendimiento frente a las tecnologías de energía renovables consolidadas como lo son los aerogeneradores onshore o la energía fotovoltaica.

#### 4.2.2.2. AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO (AO)

Para esta categoría de impacto el aerogenerador offshore, la boya con brazo y Mutriku tienen un impacto global de  $3.34E-09$  y  $7.09E-09$  y  $2.11E-08$  kg de CFC-11 equivalente por kWh respectivamente, estos valores se distribuyen entre cada una de las etapas de ciclo de vida tal como se muestra en la Figura 42.

En el caso del aerogenerador offshore, los impactos en la construcción ( $8.74E-10$  kg CFC-11/kWh), generación ( $2.46E-9$  kg CFC-11/kWh) y fin de vida ( $9.38E-12$  kg CFC-11/kWh) representan el 26.14%, 73.58% y 0.28% respectivamente. Tal como se observa en la Figura 42, la generación es la etapa con mayor contribución a esta categoría, esto se debe en un 96.7% al uso de lubricantes para el correcto funcionamiento de la turbina. El otro tres por ciento se debe a los diferentes equipos que se requieren, lo anterior implica el cambio de las palas del rotor, generador y caja de cambios una vez durante la vida útil del dispositivo, siendo las palas del rotor con un 69% las que mayor contribución tiene seguido de la caja de cambios (23%) y por último el generador con una contribución del 9%.



**Figura 42:** Categoría de Impacto de Agotamiento de la Capa de Ozono para los sistemas evaluados.

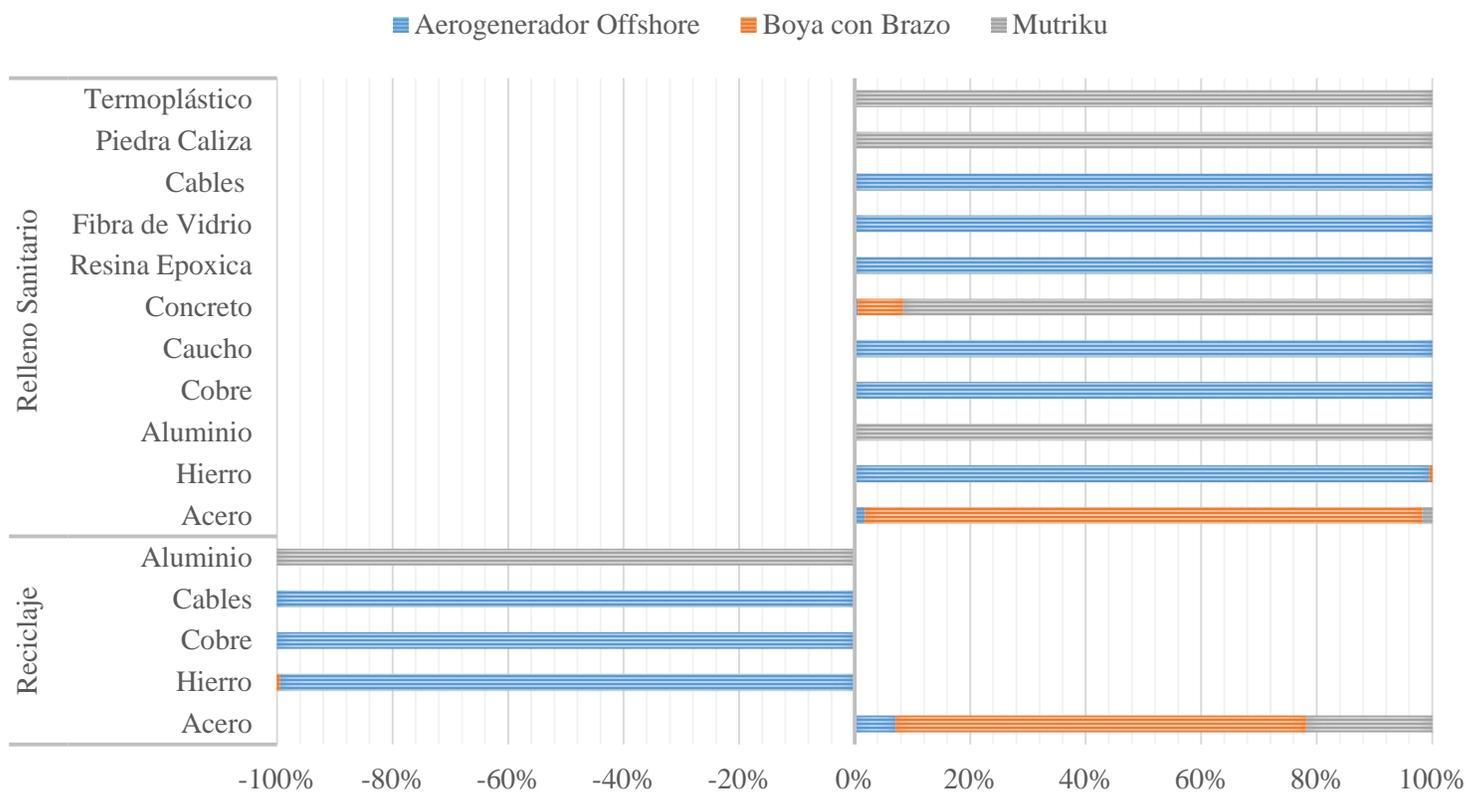
Por otra parte, el impacto global para la boya con brazo en esta categoría está distribuido en sus diferentes etapas como:  $6.58E-09$  kg CFC-11/kWh para la construcción, de  $7.90E-11$  kg CFC-11/kWh durante la etapa de generación y para el fin de vida de  $3.96E-10$  kg CFC-11/kWh, lo que representa el 93, 1 y 6% de los impactos respectivamente. El resultado obtenido para esta categoría de impacto es considerablemente menor a lo presentado por Uihlein (2016), quién es el único dentro de la literatura consultada que analiza esta categoría por lo que se resalta la importancia de que los ACV de energías del océano analicen más allá del cambio climático, puesto que como ya se ha mencionado estas diferencias se deben no solo las discrepancias entre los sistemas existentes para la captación de la energía de las olas, la capacidad nominal con la que se plantea operan los diferentes sistemas, sino también a la cantidad de datos disponibles para realizar los estudios y la complejidad de hacer comparaciones cuando se tienen pocas referencias para hacerlo.

En la etapa de construcción las sub-etapas con mayores contribuciones son el soporte (76%) y los equipos (21.4%). Los impactos del soporte se deben en un 99% a la cimentación, para la cual se requiere acero y otros materiales de construcción, donde el primero representa el 83.3% de esos impactos por materiales. En lo que respecta a los equipos, el sistema de conversión, compuesto por el contenedor, acumulador, manómetro, tanque hidráulico y diferentes válvulas, aporta el 94% de los impactos en esta sub-etapa.

El impacto de ciclo de vida de cada una de las etapas que constituyen a Mutriku es de  $9.48E-09$  CFC-11/kWh para la construcción, de  $3.88E-10$  kg CFC-11/kWh durante la etapa de generación y para el fin de vida de  $1.12E-08$  kg CFC-11/kWh, lo que representa el 45, 2 y 53% de los impactos respectivamente. En lo que respecta a la construcción el 83% de los impactos se debe a esta categoría se deben a la planta undimotriz donde en sus diferentes sub-etapas estos se distribuyen en 41% en las cámaras de aire, 33% en la sala de turbinas, 21% en la pavimentación y un 5% en los equipos.

En lo que respecta al 2% de los impactos debidos a la generación, el agua consumida para cubrir los servicios que se requieren en la planta es donde mayores impactos se acumulan, representando el 57.15%, el resto de los impactos se deben al mantenimiento del sistema mecánico (42.84%) y al sistema eléctrico con tan solo un 0.01%.

Como se muestra en la Figura 42, para esta categoría los impactos evitados, no son suficientes para mejorar el desempeño ambiental significativamente, en ninguna de las tres tecnologías evaluadas, durante la etapa de fin de vida. Lo anterior quiere decir que en ninguno de los escenarios planteados (reciclaje o relleno sanitario) para la disposición final de los materiales utilizados tiene un impacto positivo sobre el rendimiento ambiental de los dispositivos. La Figura 43, presenta la contribución de cada uno de los escenarios de disposición final planteados para cada dispositivo.



**Figura 43:** EICV Categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono de los escenarios de disposición final para cada sistema evaluado.

Para las tres tecnologías estudiadas, los escenarios de reciclaje del acero y relleno sanitario del concreto son los que mayor contribución aportan a los impactos de la etapa de fin de vida. En el caso del aerogenerador, los impactos globales por el uso de materiales para esta categoría son del 15.77% donde el acero y la resina epoxica tienen una contribución de 6 y 5% de respectivamente, siendo los dos materiales más utilizados. Al ser los dos materiales con mayor consumo era de esperar que sus escenarios de disposición final fueran también los que mayor contribución tuvieran en la etapa de fin de vida.

Los impactos evitados que se muestran en la Figura 43, para el aerogenerador offshore se deben a los escenarios de reciclaje del resto de los materiales ferrosos (hierro y cobre) y los cables que se integran los diferentes componentes del aerogenerador offshore.

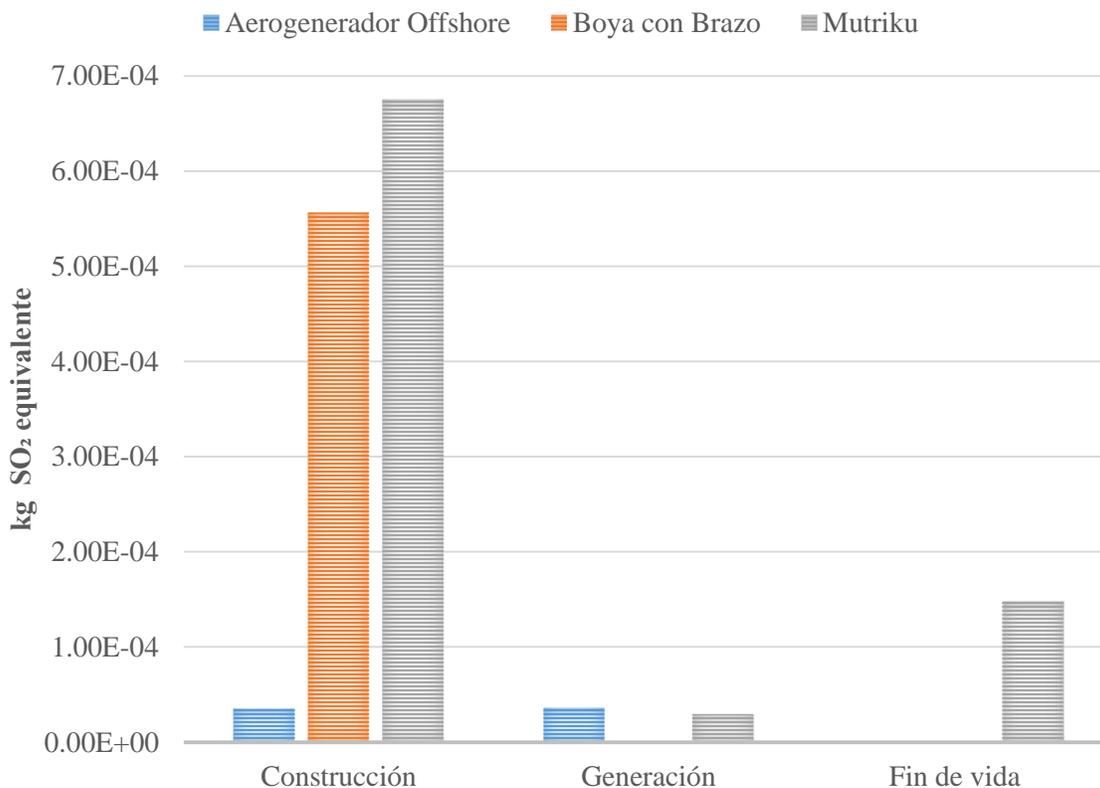
Por su parte, los impactos de la boya con brazo por el uso de materiales para esta categoría son del 92% del total, donde el consumo de acero aporta 83.4% de los mismos. En lo que se refiere a la Figura 43, los escenarios de disposición final que mayor contribución aportan a la etapa de fin de vida son, como ya se mencionó, son el reciclaje del acero y el relleno sanitario del concreto. Los escenarios de reciclaje del hierro y aluminio, tienen una contribución positiva en la disminución de los impactos, sin embargo, esta es mínima debido a que las cantidades de estos materiales necesarios para la fabricación del dispositivo son muy pequeñas respecto al acero, razón por la cual no se ve una mejora significativa en el desempeño ambiental del dispositivo.

Por otra parte, para Mutriku solamente el escenario de reciclaje del aluminio tiene un impacto positivo en el desempeño ambiental. Sin embargo, este no es suficiente para compensar los impactos asociados a la disposición final del acero, tanto en el relleno sanitario como en un centro de reciclaje, y del resto

de los materiales utilizados a lo largo de su ciclo de vida, los cuales representan un 46% de los impactos globales en esta categoría, siendo el concreto el más representativo (33.65%).

### 4.2.2.3. ACIDIFICACIÓN TERRESTRE (AT)

Para esta categoría el aerogenerador offshore, la boya con brazo y el Mutriku contribuyeron con 5.59E-05, 5.34E-04 y 8.53E-04 kg de SO<sub>2</sub> equivalente por kWh generados. Tales resultados se dividen en las etapas de construcción, generación y fin de vida tal como se muestra en la Figura 44.



**Figura 44:** Categoría de Impacto de Acidificación Terrestre para los sistemas evaluados.

En el caso del resultado obtenido para el aerogenerador offshore estudiado se encuentra dentro de lo reportado en la literatura (Schleisner, 2000; Weinzettel et al., 2009; Yang et al., 2018). En la Figura 44, también se observa que la etapa de generación es ligeramente mayor que la de construcción, donde se tiene un 63% y 64% respectivamente. De donde, los impactos correspondientes a la etapa de generación el 84.2% corresponden al lubricante necesario para el correcto mantenimiento de la turbina, seguido por el cambio de las palas del rotor (6.6%), el resto de los impactos son debido a los cambios de otros equipos requeridos: caja de cambios (4.3%) y el generador (4.9%).

De los impactos correspondientes a la etapa de construcción (64%) se distribuyen en sus diferentes sub-etapas de la siguiente forma: 43.97% en el soporte, 39.88% en los equipos, 8.18% en el cable sub-marino, 7.12% en los combustibles y el 0.85% restante en el transporte. Los impactos evitados debido a la gestión de los residuos en la etapa de fin de vida son del 26.30% de los impactos generados a lo largo del ciclo de vida del aerogenerador.

En lo que respecta a la boya con brazo los kg de SO<sub>2</sub> equivalente por kWh se encuentran distribuidos en las etapas de construcción, generación y fin de vida de la siguiente manera: 5.56E-04, 9.84E-07 y -2.38E-05.

En la etapa de construcción nuevamente la mayoría de los impactos se deben al soporte (76.31%) y a los equipos (23.01%). Dentro de los impactos del soporte el 99% de estos son debidos a la cimentación, donde el consumo de acero es el material que mayor contribución tiene con un 90.6%. En la sub-etapa de equipos el sistema de conversión es el que mayores impactos genera con el 88%, el 12% restante esta repartidos en el sistema de generación (8%) y el de captación (4%).

En la etapa de generación aceite necesario para que funcione correctamente el sistema de conversión de energía tiene el 91% de los impactos. Los impactos evitados por la correcta gestión de los residuos para esta categoría de impacto son del 4.46%, mayormente debido al reciclaje del acero.

Por otra parte, para Mutriku, la etapa de construcción representó el 79% (6.75E-04) de los impactos, durante la generación con se contribuye con el 4% (2.97E-05) y el fin de vida con 17% (1.48E-04).

Los impactos ambientales ligados a la etapa de construcción se deben principalmente a las diferentes sub-etapas que conforman la Planta Undimotriz, en un 72%, siendo la construcción de las cámaras de aire la de mayor contribución (44%), esto se debe a las grandes cantidades de concreto (70%) y piedra caliza (30%) que se necesitan para las 16 cámaras de aire que conforman a Mutriku. El 28% restante de los impactos de la construcción se deben a la estructura de soporte, donde los materiales utilizados en la construcción del Dique en Talud representan el 98.2% de los impactos y el 1.8% restante se debe al acero consumido en la cimentación.

Durante la generación los impactos se deben en un 58% al mantenimiento del sistema mecánico, un 31% al sistema eléctrico y el 11% restante al consumo de agua para abastecer los diferentes servicios de la planta de energía de las olas. Mientras que, para el fin de vida de las instalaciones, la disposición final de Piedra Caliza aporta a la mayor cantidad de emisión de SO<sub>2</sub> eq., dentro de los diferentes escenarios propuestos.

Para esta categoría de impacto, Thomson et al. (2019), reportan resultados para un dispositivo undimotriz, Pelamis, con una capacidad nominal de 750 kW, lo que entre otros tantos factores ya mencionados con anterioridad podría explicar porque los resultados difieren tanto en cantidad, pero es importante resaltar que no en magnitud, lo anterior se puede explicar a que en para los dispositivos de extracción de energía undimotriz se requieren grandes cantidades de acero, siendo este el principal contribuidor a los impactos ambientales.

#### 4.2.2.4. EUTROFIZACIÓN MARINA (EM)

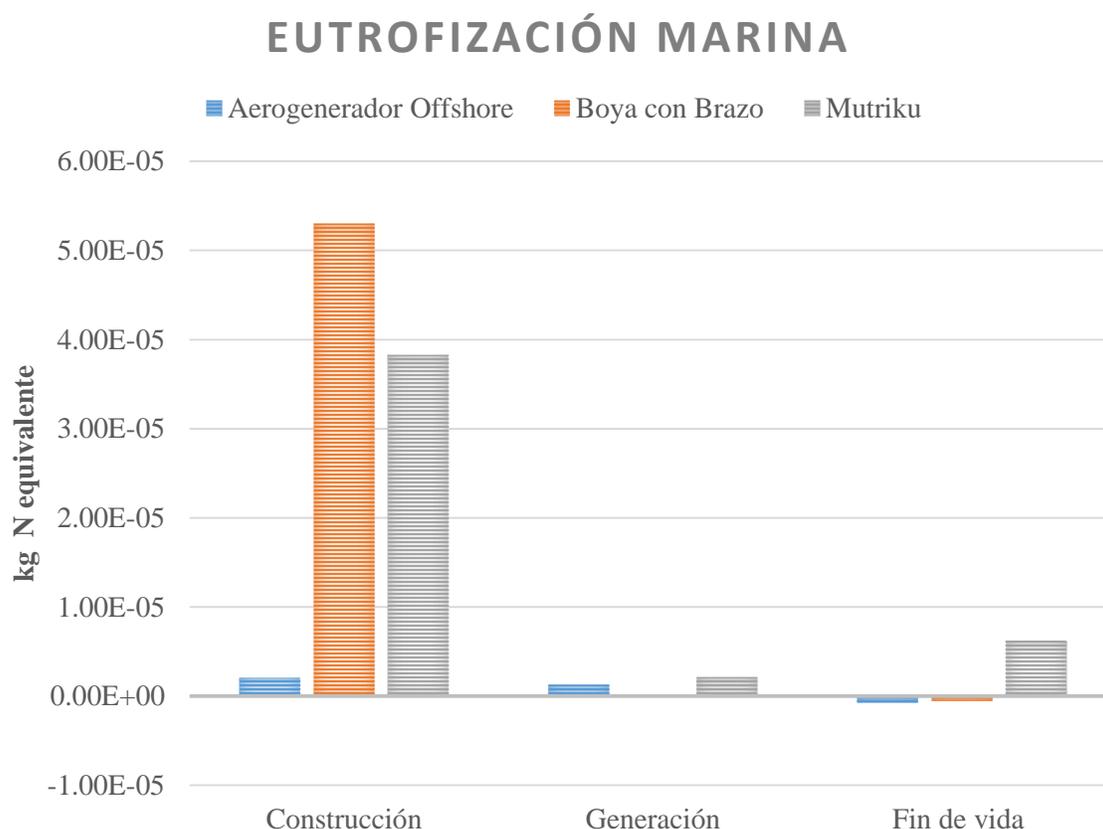
En la Figura 45, se muestran los impactos de cada uno de los sistemas de extracción de energía del océano para la categoría de Eutrofización Marina, cuyas unidades son kg N equivalente por unidad funcional (kWh).

El aerogenerador offshore se tiene un impacto global de 2.60E-06. La etapa de construcción es en la que se concentran la mayoría de los impactos (79%) lo que corresponde a un valor de 2.05E-06 kg N equivalente/kWh, mientras que la generación tiene un impacto de 50% que representa un valor de 1.30E-06 kg N equivalente/kWh. Los impactos asociados a esta categoría se ven reducido en un 29% debido a la gestión de los residuos en la etapa de fin de vida.

El dispositivo undimotriz “boya con brazo” se tiene un impacto global de 5.25E-05 kg N equivalente/kWh donde la construcción es la etapa que mayores impactos genera con un valor de

5.30E-05, seguido de la generación (3.72E-08) y el fin de vida (-5.46E-07) que representa un 1.04% de impactos evitados debido a los escenarios de reciclaje de los materiales ferrosos, principalmente del acero, ya que a lo largo del ciclo de vida del dispositivo se utilizan grandes cantidades de dicho material. Los impactos asociados a consumo del acero representan el 95.17% de los impactos globales y su uso esta concentrado en la etapa de cimentación de la boya con brazo.

En la etapa de generación los impactos por el uso del aceite son del 78% mientras que el aditivo es del 22%.



**Figura 45:** Categoría de Impacto de Eutrofización Marina para los sistemas evaluados.

Por otra parte, para Mutriku, la etapa de construcción representó el 82% (3.83E-05) de los impactos, durante la generación con se contribuye con el 4.6% (2.15E-06) y el fin de vida con 13.4% (6.26E-06), dando como resultado un impacto global de 4.67E-05 kg N equivalente.

Los impactos ambientales ligados a la etapa de construcción se deben principalmente a las diferentes sub-etapas que conforman la Planta Undimotriz, en un 71%, siendo la construcción de las cámaras de aire la de mayor contribución (42%), esto se debe a las grandes cantidades de concreto (69%) y piedra caliza (31%) que se necesitan para las 16 cámaras de aire que conforman a Mutriku. El 29% restante de los impactos de la construcción se deben a la estructura de soporte.

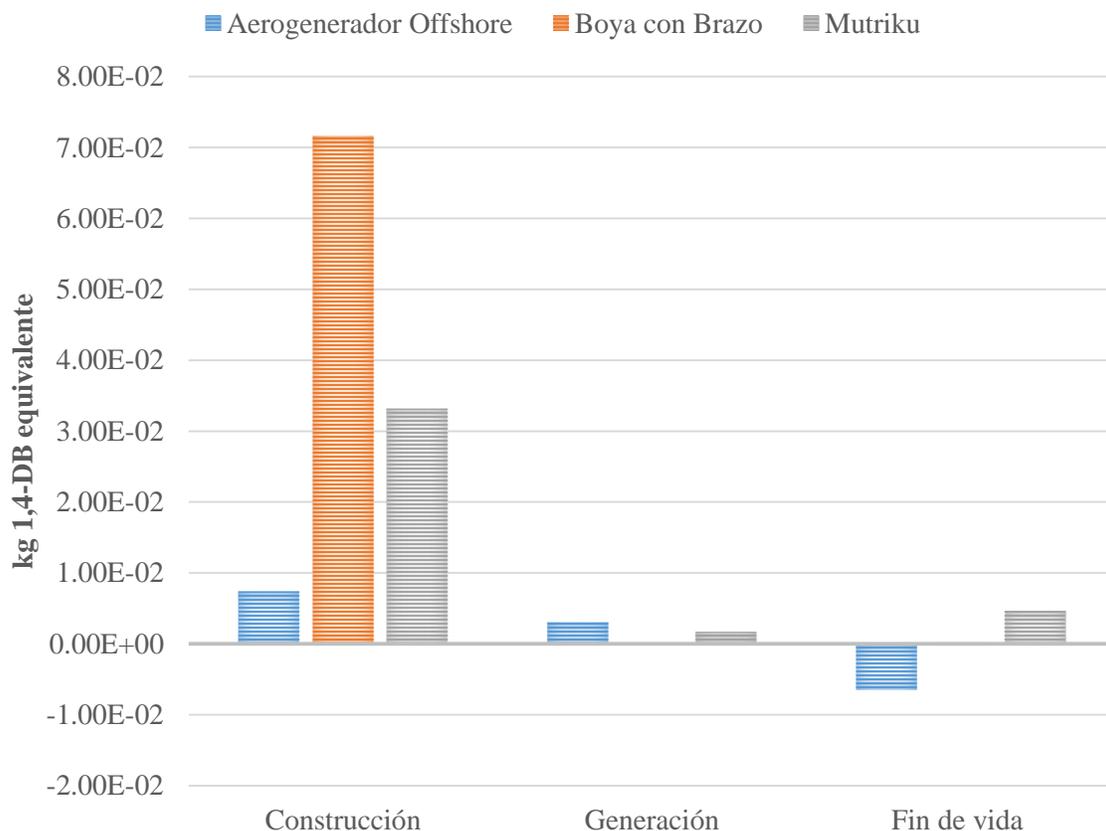
Durante la generación los impactos se deben en un 46% tanto al mantenimiento del sistema eléctrico como al del sistema mecánico y el 8% restante al consumo de agua para abastecer los diferentes servicios de la planta de energía de las olas. Mientras que, para el fin de vida de las instalaciones, la disposición final de Piedra Caliza aporta a la mayor cantidad de emisión de N eq., dentro de los diferentes escenarios propuestos.

### 4.2.2.5. TOXICIDAD HUMANA (TH)

En la Figura 46, se muestran los valores para cada una de las etapas de ciclo de vida, para los tres sistemas de generación de energía a través del océano estudiados. El impacto global obtenido para el aerogenerador offshore en esta categoría es de  $4.13\text{E-}03$  kilogramos de 1,4-DBC equivalente por unidad funcional, donde la construcción, generación y fin de vida tienen valores de  $7.38\text{E-}03$ ,  $3.10\text{E-}03$ ,  $-6.36\text{E-}03$  kg de 1,4-DCB equivalente/kWh respectivamente, los cuales corresponden al 179%, 75% y a un impacto evitado del 154%.

Los procesos asociados al consumo de cobre, el cual es necesario para la fabricación de diferentes componentes que integran la turbina del aerogenerador offshore, después de aquellos relacionados con el consumo de acero (86.4%), son los que mayor contribución tienen en esta categoría con un 69.3% de los impactos globales, coincidiendo con lo reportado en la literatura (Weinzettel et al., 2009). Lo anterior se debe a que el cobre durante sus procesos de extracción y obtención del material refinado, emite grandes cantidades de compuestos químicos, donde el mercurio es el principal, mientras que para el cobre reciclado las principales emisiones son de arsénico, según lo reportado para un estudio realizado en China (Hong et al., 2018).

De igual forma en la Figura 46, se observan que los impactos para la boya con brazo en sus etapas de construcción, generación y fin de vida son de  $7.16\text{E-}02$ ,  $5.89\text{E-}05$  y  $2.25\text{E-}04$  respectivamente, lo que da un impacto global para esta categoría de impacto de  $7.19\text{E-}02$  kg de 1,4-DBC equivalente/kWh. Lo que significa porcentualmente para cada etapa: 99.6% se debe a la construcción, el 0.082% a la generación y hay un impacto del 0.31% debido a los diferentes escenarios de disposición final (reciclaje y relleno sanitario) planteados para este trabajo.



**Figura 46:** Categoría de Impacto de Toxicidad Humana para los sistemas evaluados.

Para Mutriku, en esta categoría se generaron  $3.95E-02$  kg 1,4-DB equivalente por unidad funcional, la etapa de construcción contribuyó con 83.8% ( $3.32E-02$ ) de los impactos ambientales, durante la generación con 4.4% ( $1.72E-03$ ) y el fin de vida con 11.8% ( $4.67E-03$ ).

Los impactos ambientales asociados a la etapa de construcción se deben en mayor proporción a las sub-etapas que conforman la Planta Undimotriz, en un 93%, siendo la construcción de las cámaras de aire la de mayor contribución (34%), seguido por las salas de turbina (31%), pavimentación (20%) y equipos (15%). El 7% restante de los impactos de la construcción se deben a la estructura de soporte, siendo la construcción del dique en talud, donde el consumo de concreto y piedra caliza aportan el 80.8% de dichos impactos, mientras que el otro 19.2% se debe a la cimentación de la central.

Las grandes cantidades de concreto necesarias para la construcción de la Planta Undimotriz, que representa el 67.3% de los impactos generados en esta categoría a lo largo de esta etapa de ciclo de vida, se debe principalmente a las emisiones generadas en el horno de cemento, seguido de la energía requerida, así como los insumos y equipos necesarios para la extracción y obtención de la materia prima. La principal fuente de energía son los combustibles fósiles, especialmente el carbón que provoca emisiones de hidrocarburos y metales que contribuyen al deterioro de la salud humana (Stafford et al., 2016).

Durante la generación, se sabe que todos los impactos están asociados a la sub-etapa de mantenimiento. Donde un 74% es por mantenimiento del sistema mecánico, de los cuales el 96% de contribución se relaciona con los sistemas de rodetes, el resto por consumo de lubricantes y sustitución de rodamientos. El 19% restante se debe al consumo de agua para los distintos servicios y 7% por el sistema eléctrico. Mientras que, para el fin de vida de las instalaciones, la disposición final de piedra caliza, concreto y termoplástico son los escenarios que mayores aportaciones tienen.

#### 4.2.2.6. FORMACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (FMP)

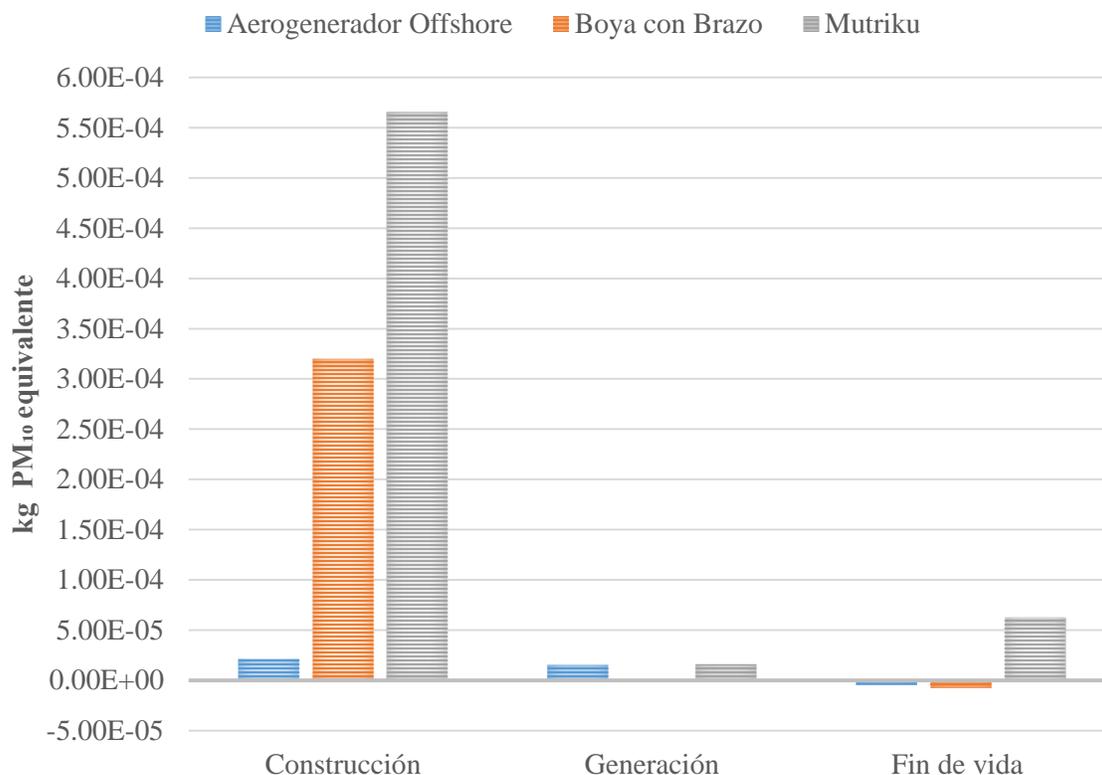
En la Figura 47, se muestran los impactos por etapa de cada sistema evaluado, siendo el impacto global de  $3.15E-05$ ,  $3.13E-04$  y  $6.44E-04$  kg  $PM_{10}$  equivalente/kWh para el aerogenerador offshore, la boya con brazo y Mutriku, respectivamente.

Las etapas de construcción, generación y fin de vida del aerogenerador offshore tienen un impacto en esta categoría de  $2.10E-05$ ,  $1.50E-05$  y  $-4.56E-06$  respectivamente, estas magnitudes representan en porcentaje el 67% para la construcción, el 47% para la generación y un impacto evitado del 14% en la etapa de fin de vida.

De los impactos debido a la etapa de construcción, los materiales con mayor contribución son el acero en un 58% seguido de la resina epoxica (10%), utilizada para la fabricación tanto de la nariz de cono y las palas del rotor, componentes que integran el rotor de la turbina eólica del aerogenerador, el hierro (9.36%) y la fibra de vidrio (6.36%), el resto de los impactos asociados a los materiales se distribuyen entre el caucho, cobre, plástico, plomo, concreto y sílica. En lo que respecta a la etapa de generación, los tres materiales con mayor impacto son el lubricante (79%), el acero (6.89%) y la resina epoxica (4.73%).

Para la boya con brazo las magnitudes por etapa son de  $3.20E-04$ ,  $3.84E-07$ ,  $-7.31E-06$  kg  $PM_{10}$  equivalente/kWh para la construcción, generación y fin de vida. Los impactos de la construcción principalmente al soporte (76%) y a los equipos (23%). A pesar de que en la Figura 47 no se logran ver los impactos asociados a la etapa de generación debido a que son mucho más pequeños que los

del aerogenerador offshore y Mutriku, estos se reparten en un 92% por el uso del aceite y un 8% por el aditivo utilizado en esta etapa. La gestión de los residuos generados al final de la vida útil del dispositivo representa una mejora ambiental del 2.33%.



**Figura 47:** Categoría de Impacto de Formación de Material Particulado para los sistemas evaluados.

Para el caso de Mutriku, la etapa de construcción aportó 87.8% (5.66E-04) de los impactos ambientales, siendo la planta undimotriz quién alcanzó 51%, de los cuales se relaciona con las cámaras de aire y las salas de turbina. Por otra parte, el soporte contribuyó con 49% debido a la construcción de los diques de talud y trabajos de cimentación.

La etapa de mantenimiento aportó 2.5% (1.59E-05) del cuál el mantenimiento del sistema mecánico contribuyó con 69%, debido a la fabricación de rodetes (98%), en menor medida a uso de lubricante y rodamientos, 20% al sistema eléctrico y 12% por los servicios.

Durante el fin de vida, se contabilizó 9.7% (6.25E-05). Tales impactos se deben a la disposición en relleno sanitario de piedra caliza y el del concreto, principalmente. Cabe resaltar que el reciclaje de acero genera impactos negativos para esta etapa, lo que quiere decir que la disposición final de este material en centros de reciclaje no genera una mejora en el desempeño ambiental del dispositivo, sino que al contrario contribuye a que aumenten los impactos ambientales que este ejerce sobre los ecosistemas.

#### 4.2.2.7. ECOTOXICIDAD MARINA (ETM)

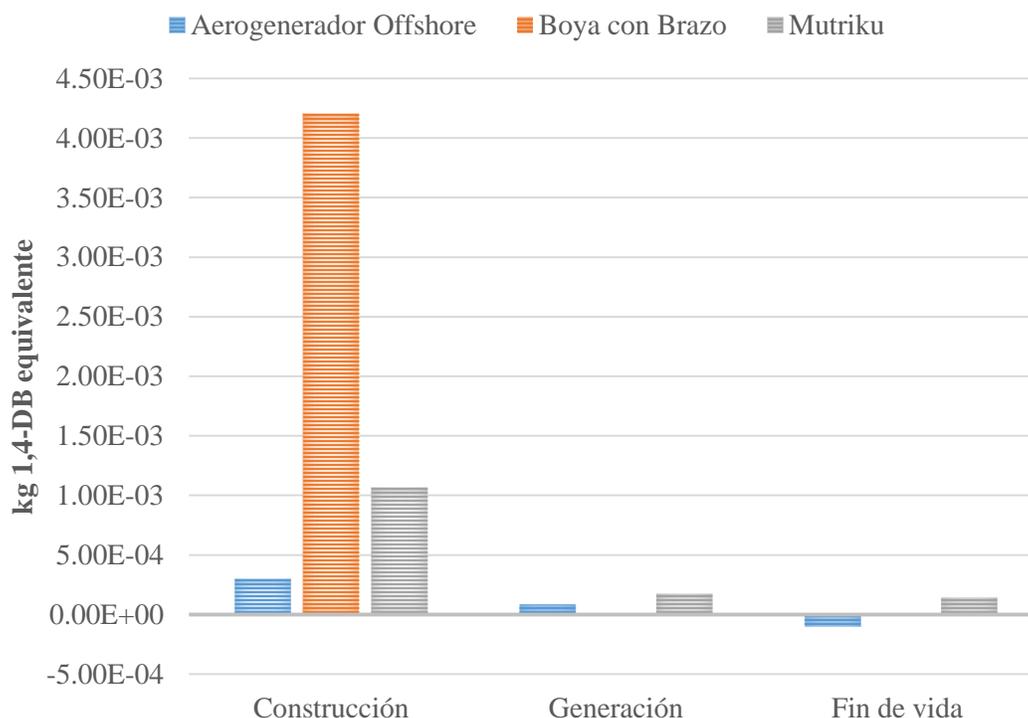
La Figura 48, se presentan los impactos asociados a la categoría de Ecotoxicidad Marina por etapa de ciclo de vida de los sistemas estudiados, donde el aerogenerador offshore tiene un impacto global de

2.85E-04 kg 1,4-DB equivalente/kWh, la boya con brazo de 4.21E-03 kg 1,4-DB equivalente/kWh y Mutriku de 1.38E-03 kg 1,4-DB equivalente/kWh.

Para el aerogenerador offshore la etapa de construcción tiene un impacto de 3.01E-04 kg 1,4-DB equivalente/kWh, la generación tiene un valor de 8.37E-05 kg 1,4-DB equivalente/kWh y la etapa de fin de vida de -9.96E-05 kg 1,4-DB equivalente/kWh. Estos valores representan el 108 y 44% de los impactos de esta categoría para la construcción y generación respectivamente, mientras que el fin de vida reduce los impactos globales en un 52%. Los impactos generados por los materiales utilizados tanto en la etapa de construcción como de generación son en un 54% debido al acero, seguido de la resina epoxica (38%) y el cobre (17%). Seguido de estos materiales van el hierro (3.5%) y la fibra de vidrio (2.0%), el resto de los impactos se distribuyen de manera diversa entre el concreto, caucho, plástico, plomo y silica, cuyos impactos son pocos debido a que se necesita poca masa de cada uno de estos para diferentes etapas del aerogenerador, o como ya se ha mencionado para el concreto, a pesar de necesitarse grandes cantidades sus impactos ambientales no son tan representativos como podrían serlo los economicos (Danhlsen, 2009).

En lo que respecta a los impactos asociados a las etapas de la boya con brazo, la construcción tiene un impacto de 4.20E-03 kg 1,4-DB equivalente/kWh lo que representa el 99.90% de los impactos de esta categoría, mientras que el 0.10% restante es por los 1.56E-06 kg 1,4-DB equivalente/kWh de la generación y el fin de vida cuyo impacto es de 2.30E-06 kg 1,4-DB equivalente/kWh.

Para las etapas de construcción y generación se requieren diversos materiales para que el dispositivo undimotriz pueda cumplir su función, en esta categoría de impacto el 98% de los impactos globales se deben a esto. De los cuales el consumo de acero es el principal contribuidor con el 96.37%, seguido por el consumo de cemento (1.39%) y el 0.24% de los impactos restantes se distribuye diversamente entre el resto de los materiales (arena, grava, agua, aluminio, termoplástico, diésel, lubricante, aceite y aditivos).



**Figura 48:** Categoría de Impacto de Ecotoxicidad Marina para los sistemas evaluados.

Mientras tanto, durante la construcción de Mutriko se generaron el 77% (1.07E-03) de las emisiones de 1,4-DB equivalente, por otra parte, el mantenimiento y el fin de vida generaron el 12.7% (1.76E-04) y 10.3% (1.43E-04), respectivamente.

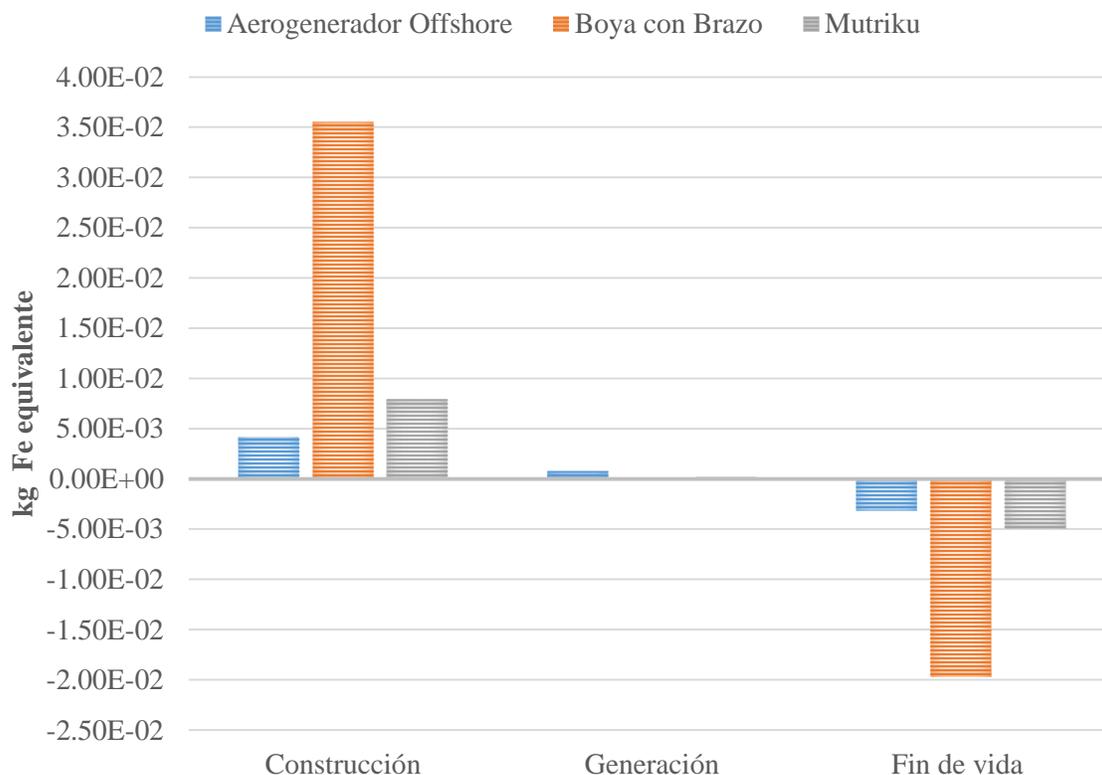
Para el caso de la construcción, la planta undimotriz contribuyó con 93% de los impactos ambientales, de los cuáles, la cámara de aire y la sala de turbinas alcanzaron el 28% y 26% respectivamente. El 46% restante se atribuye a las labores de pavimentación y utilización de maquinaria.

En el fin de vida, los impactos ambientales se distribuyen en la disposición en relleno sanitario de piedra caliza y el del concreto principalmente.

#### 4.2.2.8. AGOTAMIENTO DE LOS RECURSOS MINERALES (AM)

La Figura 49, muestra la magnitud de los impactos de cada etapa de ciclo de vida referentes a la categoría de agotamiento de recursos minerales para cada uno de los sistemas evaluados.

Se puede observar que, para el aerogenerador offshore, la etapa de construcción es la que mayores impactos asociados presenta y se debe en un 67.9% a la estructura de soporte, lo que coincide con otros estudios (Weinzettel et al., 2009; Haapala y Prempreeda, 2014) donde se reporta que para esta categoría hay un impacto de al menos el 57% debido al soporte. En esta etapa el uso de diferentes materiales requeridos para la fabricación de los diversos componentes que conforman el aerogenerador es la razón de los impactos asociados en esta categoría, debido específicamente al acero consumido para la estructura y cimentación del aerogenerador.



**Figura 49:** Categoría de Impacto de Agotamiento de los Recursos Minerales para los sistemas evaluados.

Los impactos para la boya con brazo en esta categoría son de  $3.55E-02$  kg Fe equivalente/kWh para la etapa de construcción,  $9.84E-06$  kg Fe equivalente/kWh para la etapa de generación y para el fin de vida es de  $-1.96E-02$ . Para esta categoría se tiene un impacto global de  $1.59E-02$ . La construcción es claramente la etapa donde mayor cantidad de impactos se generan, estos están distribuidos de la siguiente forma por sub etapas: 74.30% soporte, 25.61% equipos, 0.079% transporte y el 0.002% combustibles. El acero es el material con mayor contribución a lo largo del ciclo de vida del dispositivo donde el 76.48% de los impactos asociados a su consumo se deben específicamente al consumo de acero requerido para la cimentación.

Respecto a Mutriku, la etapa de construcción de la planta undimotriz aportó 90% de contribución. Tales efectos ambientales se relacionan con el uso de equipos (34%), construcción de las cámaras de aire (27%), sala de turbinas (24%) y labores de pavimentación (15%). Por otra parte, la construcción del soporte emitió el 10% restante, ligado principalmente a la construcción del dique talud.

En las labores de mantenimiento, el sistema mecánico aportó 42%, los servicios 38% y el sistema eléctrico 20%. Para el caso de sistema mecánico, el mantenimiento de rodets fue la actividad con mayores impactos para tal subetapa (76%), mientras que el consumo de lubricantes y rodamientos con 2% y 22% respectivamente. Para los servicios, la principal actividad fue abastecer el consumo de agua en las diferentes actividades de la planta de energía de las olas.

El agotamiento de los recursos minerales en el caso de los tres dispositivos es principalmente debido al consumo de acero en la etapa de construcción, significando para el aerogenerador offshore un 72% de los impactos de este material por la fabricación de la torre, para la boya con brazo representa el 76.5% debido a la cimentación y al igual que Mutriku que se debe a la cimentación. Lo anterior, coincide con lo que se sabe de las diferentes tecnologías de extracción de energía renovable donde se afirma que los minerales consumidos son mayormente utilizados en la etapa de construcción, ya que la etapa de generación necesita pocos suministros (Liberei y Gheewala, 2017).

#### 4.2.2.9. AGOTAMIENTO DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES (ACF)

La Figura 50, presenta los resultados obtenidos para cada una de las etapas de los sistemas de generación de energía evaluados en el presente estudio en la categoría de Agotamiento de los Combustibles Fósiles.

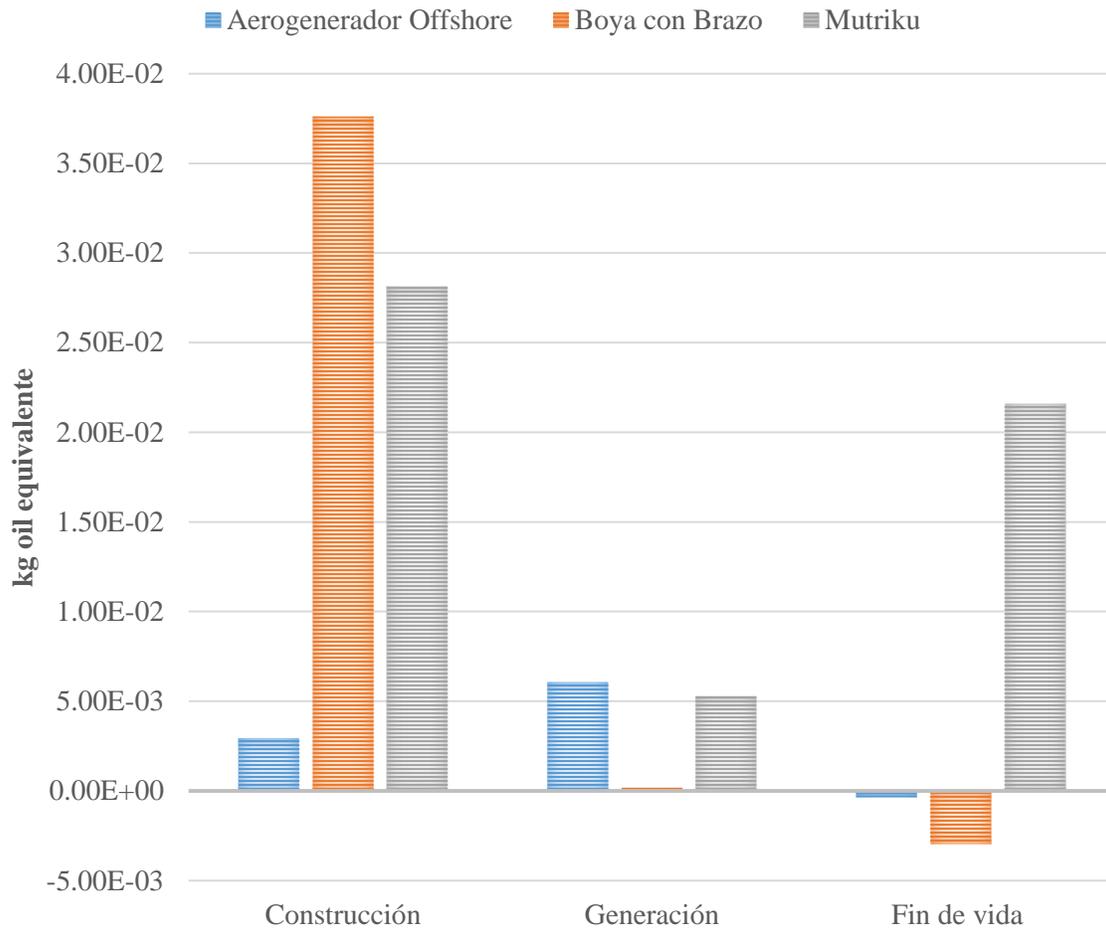
El impacto global del aerogenerador offshore para esta categoría es de  $8.66E-03$  kg de combustible equivalente/kWh, y las magnitudes por etapa son:  $2.95E-03$  para la construcción,  $6.05E-03$  en la fase de generación y de  $-3.40E-04$  para el fin de vida, tal como se muestran en la Figura 50. La etapa de generación representa el 71% de los impactos de esta categoría, seguido por la etapa de construcción con el 34%, mientras que los impactos evitados por los escenarios de fin de vida planteados son del 5%.

En lo que respecta a los impactos asociados en esta categoría a la etapa de construcción, se tiene que el 35.7% es debido a la sub-etapa de soporte, el 36.6% a los equipos, el 25.9% a los combustibles requeridos para la instalación, el 1% al cable submarino y el 0.7% al transporte. Los combustibles utilizados en esta etapa son combustóleo y diésel, de los cuales el 63% de los impactos asociados a la sub-etapa de combustibles son debidos al combustóleo y el 37% restante al diésel.

En la generación, el 93.5% de los impactos se debe al lubricante requerido por la turbina para su funcionamiento durante su mantenimiento. Los equipos que deben ser remplazadas representan el

otro 6.5% de los impactos y se distribuyen de la siguiente manera: 3.9% se debe a las actividades de manufactura de las palas del rotor que deben ser cambiadas, el 1.8% al remplazo de la caja de cambios y tan solo el 0.8% al generador que se requiere como repuesto durante la vida útil del dispositivo.

El reciclaje del acero es el escenario de fin de vida que mayor contribución tiene en la disminución de impactos de esta categoría, esto se puede deber primeramente a que se trata del material más utilizado en las etapas de construcción y generación de un aerogenerador offshore.



**Figura 50:** Categoría de Impacto de Agotamiento de los Combustibles Fósiles para los sistemas evaluados.

Los impactos para la boya con brazo en esta categoría son de  $3.76E-02$  kg combustible equivalente/kWh para la etapa de construcción,  $1.84E-04$  kg combustible equivalente/kWh para la etapa de generación y para el fin de vida es de  $-2.94E-03$ . Para esta categoría se tiene un impacto global de  $3.48E-02$  kg combustible equivalente/kWh. Los impactos en la etapa de construcción se deben principalmente a las sub-etapas de soporte (76.82%) y de equipos (22.25%). Sin embargo, para el caso de las sub-etapas de combustibles y transporte es en esta categoría donde se tienen los segundos valores más altos, después de la de agotamiento de la capa de ozono (AO), con 0.133% y 0.789% respectivamente.

Para Mutriku, la etapa de construcción aportó 51.1% ( $2.81E-02$ ), la generación 9.7% ( $5.31E-03$ ) y el fin de vida 39.3% ( $2.16E-02$ ). Durante las actividades de construcción, la planta undimotriz contribuyó con 87% de los impactos, derivado a la construcción de las cámaras de aire en un 38%,

seguido de la sala de turbinas (32%), un 20% se debe a las actividades de pavimentación y el 10% restante a la manufactura de los equipos. El 13% restante se debe al soporte, mismos que se relaciona con las actividades del dique de talud (93.5%) y a la cimentación de la central (6.5%).

En el mantenimiento, la mayor proporción de los impactos asociados a esta sub-etapa se debe al sistema eléctrico con 74%, al sistema mecánico con 22% y en un 4% a los servicios de agua requeridos para diferentes actividades dentro de la planta undimotriz. Para el sistema mecánico, los mayores impactos se originan nuevamente debio al mantenimiento que se le da a los rodets con 96% de los impactos asociados a esta sub-etapa, el resto se trata del consumo de lubricante y rodamientos con 2% cada uno. Por último, en el fin de vida, existen diversas ventajas del reciclaje de acero, puesto que este tiene un impacto positivo en el desempeño del sistema. Sin embargo, por el contrario, la disposición de piedra caliza y del concreto representan los mayores impactos en la etapa de fin de vida.

## 5. CONCLUSIONES

Para los tres dispositivos analizados, en las distintas categorías de impacto ambiental evaluadas, exceptuando las categorías de Agotamiento de los Combustibles Fósiles (ACF), Agotamiento de la Capa de Ozono (AO) y Acidificación Terrestre (AT) en el caso del aerogenerador, al igual que AO en el caso de Mutriku, la etapa de construcción es la que presenta la mayor cantidad de los impactos de ciclo de vida. Los impactos asociados a esta etapa van desde el 26 hasta el 237% para el aerogenerador offshore, del 93 al 223% para la boya con brazo y del 45 hasta 247% para Mutriku. Los impactos de la etapa de construcción están asociados a la extracción y transformación de grandes cantidades de minerales para la manufactura de los diferentes componentes que integran a cada una de las tecnologías. Por esta razón, es necesario que los dispositivos de extracción de energía oceánica se diseñen pensando no solo en la resistencia del material sino también en sus cadenas productivas, de manera que a la hora de seleccionarlos se decidan por aquellos que tengan menores impactos asociados.

En el caso del aerogenerador offshore y la boya con brazo, el acero juega un rol principal. Los potenciales impactos ambientales de este mineral oscilan entre el 6 y el 215% en las diferentes categorías analizadas. Para Mutriku, el concreto fue el material con mayores impactos asociados, que para las diferentes categorías de impacto evaluadas van desde el 27% hasta el 146%. Tanto para el acero como para concreto, se ha reportado que se requiere de grandes cantidades de energía a lo largo de sus cadenas productivas, dicha energía es abastecidas por medio de combustibles fósiles, ya sea de manera directa con la quema de gas liquado de petróleo, carbón o gas natural o de manera indirecta por el uso de energía eléctrica (Burchart, 2013; Olmez et al., 2016; Stafford et al., 2016), lo que no solo genera emisiones de gases efecto invernadero sino también diferentes compuestos que dañan la salud humana y de los ecosistemas. De ello se puede concluir que es necesario diversificar el mix energético nacional, de forma que se reduzcan los impactos indirectos asociados a la energía eléctrica aumentando el desempeño ambiental de los dispositivos. De igual forma, es necesario promover mejoras en las industrias de transformación de minerales, específicamente la industria cementara, minera y siderúrgica que son las que se detectaron como fundamentales en la reducción de impactos ambientales de los sistemas de energía a través del océano propuestos.

En la etapa de generación es donde se produce una menor cantidad de impactos ambientales puesto que oscilan de entre 0.06 y el 75% para los dispositivos analizados en las diferentes categorías estudiadas. Donde las categorías de acidificación terrestre, agotamiento de combustibles fósiles y agotamiento de la capa de ozono, para el caso del aerogenerador, tienen un impacto del 64, 73 y 74% respectivamente y son mayores que en la etapa de construcción.

Dentro de esta etapa se tiene dos sub-etapas, el mantenimiento y la operación, es en la primera donde se generan todos los impactos ambientales, esto se debe a que durante la operación los dispositivos de extracción de energía oceánica no requieren ningún insumo o materia prima para su funcionamiento. Para el caso del aerogenerador los potenciales impactos ambientales se deben al uso de lubricante entre un 41 y un 98% para las diferentes categorías analizadas. En la boya con brazo los impactos de esta etapa son debido al aceite y el aditivo con el que funciona el sistema de conversión donde el aceite, al utilizarse en mayor cantidad genera entre el 78 y el 96% de los impactos de esta subetapa; mientras que para Mutriku el cambio de diversos componentes que integran el sistema mecánico es donde se encuentran la mayor cantidad de impactos asociados desde el 22 hasta el 96% en las diversas categorías estudiadas. Es por ello que se identifica como buscar materiales para las partes móviles de los dispositivos cuyo desgaste por fricción sea menor de manera que se reduzca el consumo de este tipo de insumos.

Para esta etapa de generación, en la literatura existe una gran cantidad de supuestos en lo que a los servicios de mantenimiento de los dispositivos se refiere. Sin embargo, este sesgo existe sobre todo para los dispositivos undimotrices, debido a la gran variedad de tecnologías existentes y las que se están desarrollando. Por esta razón, se puede decir que los resultados presentados para Mutriku son de gran valor al contribuir directamente a reducir la falta de conocimiento existente, al menos para los dispositivos undimotrices del tipo columna de agua oscilante, puesto que se trata de una central undimotriz que lleva funcionando alrededor de 10 años y los datos fueron obtenidos directamente por el personal que se encarga de darle mantenimiento a dicha planta de energía.

Se identifico que la etapa de fin de vida es no solo la que mayor incertidumbre tiene, debido a que las tecnologías de extracción de energía del océano, desplegadas están apenas por cumplir su vida útil, razón por la cual todavía no se tienen datos específicos para esta etapa de los diferentes componentes que integran cada tecnología. Sin embargo, por la experiencia de otras energías renovables consolidadas, como la eólica terrestre o la fotovoltaica, y los resultados presentados en este trabajo, donde el impacto ambiental de los dispositivos evaluados muestran que en diversas categorías de impacto existe una mejora en el desempeño ambiental de los dispositivos debido a la correcta gestión de los residuos, siendo la categoría de Agotamiento de los Recursos Minerales (AM) la que mejores valores se obtuvo con impactos evitados del 181%, 123% y 154% para el aerogenerador, la boya con brazo y Mutriku, respectivamente. Debido a lo anteriormente mencionado, se concluyó que la correcta disposición de los diferentes materiales que integran los sistemas de generación de energía a través del océano es fundamental para asegurar que estos sean ambientalmente efectivos, lo cual implica no solo el desarrollo de nuevas formas de aprovechamiento de los materiales para asegurar su reciclado y/o reutilización dentro del mismo proceso de cada sistema de extracción de energía, de manera que se asegure su calidad y eficiencia y se incremente la capacidad de aprovechamiento de los mismos, de manera que se tenga un mercado competitivo que impulse su correcta disposición final.

De entre los tres dispositivos analizados, para cinco de nueve categorías evaluadas Mutriku es el dispositivo que mayores impactos asociados tiene. Las categorías de impacto donde los impactos asociados a Mutriku son mayores son: Cambio Climático, Agotamiento de los Combustibles Fósiles, Agotamiento de la Capa de Ozono, Formación de Material Particulado, Acidificación Terrestre. Los impactos de Mutriku respecto al aerogenerador offshore y la boya con brazo en estas categorías son de entre el 84 y el 95% así como el 37 y el 66% respectivamente. Esto se debe, principalmente a que su capacidad de generación es menor la de los otros dos dispositivos. De esto se concluye que, para sistemas de extracción de energía a través del océano a menor energía producida, mayor es la intensidad de los potenciales impactos ambientales generados por dicho sistema.

Para este estudio, los resultados obtenidos muestran que Mutriku es la tecnología con el menor desempeño ambiental, pero pueden estar sesgados, ya que la generación de energía que se consideró

en el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) para la boya con brazo es la generación de diseño. Otro factor a considerar para Mutriku, es que el ICV esta integrado por datos reales de la construcción, operación y mantenimiento de la Central Undimotriz que lleva trabajando desde el 2011 en el Puerto de Mutriku, España, razón por la cuál la incertidumbre es mucho menor que las otras dos tecnologías analizadas. A pesar de ello, aun es necesario revisar y a completar la etapa de construcción de Mutriku para tener resultados con mayor exactitud, además de seguir estudiando los efectos ambientales de este despliegue tecnológico con la finalidad de poder incluir otros impactos ambientales que la metodología de Análisis de Ciclo de Vida no contempla.

El aerogenerador offshore es, en todas las categorías de impacto, el que tiene mejor rendimiento ambiental en hasta un 95% respecto tanto a la boya con brazo como a Mutriku. Lo anterior no solo se debe a que se trata de un sistema con una alta capacidad de generación de energía, sino también a que es una industria mucho más establecida que la de los dispositivos de generación undimotriz, como es el caso de los otros dos sistemas estudiados. A pesar de ello, todavía tiene grandes retos sobre todo en la etapa de fin de vida, donde la disposición final de los componentes que integran la turbina eólica, especialmente las palas del rotor que al estar fabricadas con fibra de vidrio y resina epoxica representan un desafío técnico para su aprovechamiento ya sea reciclándolas o reutilizándolas, sobre todo en México donde todavía existe un atraso tecnológico para la correcta disposición final de estos materiales.

A pesar de la incertidumbre que puedan tener los resultados presentados en este trabajo, estos muestran que el desempeño ambiental de los dispositivos de energía oceánica analizados tienen un rendimiento ambiental, respecto a la generación de gases efecto invernadero, considerablemente mayor a otras tecnologías de energías renovables. El aerogenerador offshore genera aproximadamente un 92%, mientras que la boya con brazo un 16% menos emisiones que el promedio reportado para la energía fotovoltaica según Nugent y Socacool (2014) y Pehn (2006). De esta forma se muestra la importancia del desarrollo de estas tecnologías tanto a nivel técnico como académico, ya que compiten satisfactoriamente contra las tecnologías de extracción de energía renovable actuales mostrando que pueden impulsar una economía baja en carbono al ser una opción de diversificación del mix energético nacional.

En comparación con otras energías del océano, los tres dispositivos analizados presentan una menor generación de gases efecto invernadero que el promedio reportado en literatura para tecnologías de extracción de energía por corrientes marinas, gradiente salino y gradiente térmico (Banerjee et al., 2013; Aalbers, 2015; Zamorano, 2019). De igual forma la generación de energía eléctrica a partir de un sistema de generación undimotriz por columna de agua oscilante (Mutriku), un sistema de generación undimotriz por absorbedor puntual (boya con brazo) y un sistema eólico marino (aerogenerador offshore) tienen en un 71, 83 y 98% respectivamente menos emisiones de gases efecto invernadero que la planta de generación de energía eléctrica por medio de la combustión del carbón propuesta por Li et al. (2020). De manera que se puede concluir que apostar por el desarrollo e implementación de las tecnologías de generación de energía a través del océano presentadas en este trabajo, es sin duda una opción para reducir los impactos ambientales asociados a las formas de generación de energía convencional, basadas en combustibles fósiles.

Los resultados obtenidos tanto en el Inventario de Ciclo de Vida como Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida, son de gran importancia para integrar la base de datos de CEMIE-Océano, con la cual es posible comparar los diferentes sistemas de energía oceánica desarrollados y trabajar sobre el diseño e implementación de las tecnologías con un enfoque de ciclo de vida permitiendo que el mix energético nacional se integre cada vez más con fuentes de energía renovable, asegurando así un desarrollo energético sostenible para México.

La relevancia de este estudio radica en el aporte de conocimiento científico sobre los potenciales impactos ambientales generados por las tecnologías de extracción de energía a través del océano, cubriendo de esta forma una de las tantas lagunas que hoy en día se tienen sobre estos sistemas y su interacción con el medio ambiente donde se planean instalar, de forma que los diferentes actores puedan tomar decisiones informadas para construir el futuro de estos sistemas de energía, de manera que se pueda alcanzar su maduración y comercialización en México.

## 5.1. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La energía del océano es una energía renovable que sigue en desarrollo y por lo tanto en crecimiento. Además, se ha demostrado que este tipo de energía tiene el potencial de ayudar a cumplir los ODS. Sin embargo, también se sabe que el océano sigue siendo un ambiente poco conocido y los impactos ambientales sobre este ecosistema sigue siendo desconocidos en muchos aspectos, por lo que hay mucho potencial de investigación.

Desde el punto de vista de ACV, existen diversos impactos ambientales para los cuales las metodologías de evaluación de impacto actuales no tienen factores de caracterización y por lo tanto no hay categorías de impacto que medían sus potenciales daños sobre el medio ambiente. Por lo que algunos de los impactos ambientales sobre los cuales se puede trabajar en el desarrollo de metodologías para su caracterización dentro del marco de la metodología de análisis de ciclo de vida son:

- Impactos sobre la biodiversidad marina.
- Impactos sobre las diferentes especies de aves.
- Impactos debido al ruido.
- Impactos electromagnéticos.

De igual forma, existe una necesidad, muy bien identificada, no solo en este trabajo sino en la literatura consultada, de desarrollar materiales cuyo impacto ambiental sea mejor que los que actualmente se utilizan para la manufactura de los dispositivos, así como de recubrimientos que permitan extender la vida útil de los materiales sin poner en riesgo su calidad ni su eficiencia, pero también sin aumentar el riesgo de alterar el medio marino.

En el caso particular de México, se recomienda seguir investigando sobre los escenarios de disposición final de todos los materiales que se utilizan en la manufactura y mantenimiento de los dispositivos, poniendo especial atención en los que se han identificado a nivel internacional como materiales cuya disposición final resulta un desafío: la fibra de vidrio y la resina epoxica.

Igual forma se recomienda evaluar el impacto social de las tecnologías de extracción de energía del océano, de forma que, al integrar estos estudios junto con el aquí presentado, se puedan llegar a concretar políticas públicas y económicas para su despliegue.

## REFERENCIAS

Aalbers, R.R.D. (2015). Life Cycle Assessment of Ocean Thermal Energy Conversion. Master's Thesis. Sustainable Energy and Technology. Delft University of Technology. Delft, The Netherlands.

Alamian, R., Shafaghat, R., Safdari S., M., Bayani, R. & Hossein A., A. (2017). An empirical evaluation of the sea depth effects for various wave characteristics on the performance of a point absorber wave energy converter. *Ocean Engineering*.

Amundarain O., M. (2012). La energía renovable procedente de las olas. *e-Revista de didáctica*.

Andersen, P. D., Bonou, A., Beauson, J. & Brøndsted, P. (2014). Recycling of wind turbines. In H. Hvidtfeldt Larsen, & L. Sørderberg Petersen. (Eds.). DTU International Energy Report 2014: Wind energy- drivers and barriers for higher of wind in the global power generation mix (pp. 91-97). Technical University of Denmark (DTU).

Antón Vallejo, M. A. (2004). Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Universitat Politècnica de Catalunya.

Apolonia, M. & Simas, T. (2021). Life Cycle Assessment of an Oscillating Wave Surge Energy Converter. *Journal of Marine Science and Engineering*.

Aracelay F. M., I. (2020). Análisis y Comparativa de los Parámetros de Operación de las Turbinas de la Planta Undimotriz de Mutriku en el Periodo 2018-2019. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería de Bilbao. Universidad del País Vasco. España.

Aso, R. & Cheung, W.M. (2015). Towards greener horizontal-axis wind turbines: analysis of carbon emissions, energy and costs at the early design stage. *Journal of Cleaner Production*.

Bank, L.C., Arias, F.R., Yazdanbakhsh, A., Gentry, T.R, Al-Haddad, T., Chen, J-F. & Morrow, R. (2018). Concepts for Reusing Composite Materials from Decommissioned Wind Turbine Blades in Affordable Housing. *Recycling*.

Banerjee, S., Duckers, L. & Blanchard, R.E. (2013). An overview on greenhouse gas emission characteristics and energy evaluation of ocean energy systems from life cycle assessment and energy accounting studies. *Journal of Applied and Natural Science*.

Berrios, G., Rivarola, A. & Arena, A.P. (2009). Evaluación comparativa de turbinas eólicas de gran potencia empleando metodología de análisis de ciclo de vida. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.

Bhat, I.K. & Prakash, R. (2009) LCA of renewable energy for electricity generation systems -A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Bonher S.A de C.V. (2014). Carpeta Información Técnica: Equipo Undimotriz.

Bonou, A., Laurent, A., & Olsen, S.I. (2016). Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application. *Applied Energy*.

Breton, S.P. & Moe, G. (2009). Status, plans and technologies for offshore wind turbines in Europe and North America. *Renewable Energy*

Bruschi, D.L., Fernandes, J.C.S., Falcao, A.F.O., & Bergmann, C.P. (2019). Analysis of the degradation in the Wells turbine Blades of the Pico oscillating wáter columna wave energy plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Burchart K., D. (2013). Life cycle of steel production in Poland: a case study. *Journal of Cleaner Production*.

Caballero S., C. (2011). Estudio de Plantas de Producción de Energías Renovables con Aprovechamiento de la Energía del Mar. Tesis de Licenciatura. Universidad Carlos III de Madrid. España.

Candel L., L.I. (2014). Diseño e impacto ambiental de un parque eólico offshore. Tesis. Universidad Politécnica de Cartagena. España.

Cascajo, R., García, E., Quiles, E., Correcher, A. & Morant, F. (2019). Integration of Marine Wave Energy Converters into Seaports: A Case Study in the Port of Valencia. *Energies*.

Castiella T., A. (2013). Diseño del modelo y control de un absorbedor puntual de columna oscilante de agua utilizado para la conversión de energía undimotriz. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones. España.

CEMEX Concretos. (s.f.). Manual del Constructor. Recuperado [Agosto del 2020] desde: <https://www.cemex.com/documents/27057941/45587277/aplicaciones-manual-construccion-general.pdf/772d227d-d168-efc4-a2e3-86ba78c80cb4>

CFE. (2014). Ficha de Gestión Ambiental: “Sistema de Pruebas para la Generación de Energía Eléctrica (Undimotriz) a instalar en el Muelle 1, Puerto de El Sauzal, B.C.”

Chipindula, J., Botlaguduru, V.S.V., Du, H., Kommalapati, R.R. & Huque, Z. (2018). Life Cycle Environmental Impact of Onshore and Offshore Wind Farms in Texas. *Sustainability*.

Copping, A.E., Butner, R.S., Hanna, L.A. & Whiting, J.M. (2012). Renewable Ocean Energy and the Marine Environment: Filling Gaps in Knowledge. In Proceedings of the 4th International Conference on Ocean Energy. Dublin, Ireland.

Cortés L., P.A. (2019). Análisis comparativo de la Huella de Carbono de un Parque Eólico en Tenerife- España. Instituto Politécnico de Leiria. España.

Curran, M.A. (2012). Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products. WILEY.

D’aquino, C. D. A, Scharlau., C. C. & Vecchia., L.C. D. (2019). Evaluation of the energy extraction of a small-scale wave energy converter. *RBRH*.

Dahane, M., Sahnoun, M., Bettayeb, B., Baundry D. & Boudhar, H. (2017). Impact of spare parts remanufacturing on the operation and maintenance performance of offshore wind turbines: a multi-agent approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*.

Dahlsten, H. (2009). Life Cycle Assessment of Electricity from Wave Power. Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, Sweden.

Dalton, G., Madden, D., & Clare D., M. (2014). Life Cycle Assessment of the Wavestar. Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER).

Delmonte, N., Barater, D., Giuliani, F., Cova, P. & Buticchi, G. (2016). Review of Oscillating Water Column Converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*.

Dennis, H.D., Evans, A.J., Banner, A.J. & Moore, P.J. (2018). Reefcrete: Reducing the environmental footprint of concretes for eco-engineering marine structures. *Ecological Engineering*.

- Díaz T., F. (2015). Generación undimotriz mediante absorbedores puntuales con sistemas hidráulicos de conversión de potencia. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sevilla. España.
- Do, H. T., Dinh, Q. T., Nguyen, M. T., Phan, C. B., Dang, T. D., Lee, S., Park, H. G. & Kwan A., K. (2017). Proposition and experiment of a sliding angle self-tuning wave energy converter. *Ocean Engineering*.
- Dolan, S.L. & Heath, G.A. (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Utility-Scale Wind Power. Systematic Review and Harmonization. *Journal of Industrial Ecology*.
- Dones, R., Bauer, C., Bolliger, R., Burger, B., Heck, T., Röder, A. & Scherrer, P. (2007). Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries. Ecoinvent report No 5.
- Douglas, C.A., Harrison, G.P. & Chick, J. (2008). Life cycle assessment of the Seagen marine current turbine. *Journal of Engineering for the Maritime Environment*.
- Douziech, M., Hellweg, S. & Veronesi, F. (2016). Are Wave and Tidal Energy Plants New Green Technologies? *Environmental Science & Technology*.
- Elginöz, N. & Bas, B. (2017). Life Cycle Assessment of a multi-use offshore platform: Combining wind and wave energy production. *Ocean Engineering*.
- Ellabban, O., Abu-Rub, H. & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Elmehag, E. & Torosian, R. (2013). Life Cycle Assessment of an Ocean Energy Power Plant: Evaluation and Analysis of the Energy Payback Time with Comparison Between Sweden and Tanzania. Bachelor's Thesis. University of Skövde. Skövde, Sweden.
- Esteban, M. & Leary, D. (2012). Current developments and future prospects of offshore wind and ocean energy. *Applied Energy*.
- Esteban, M.D., Diez, J.J., López, J.S. & Negro, V. (2011). Why offshore wind energy? *Renewable Energy*.
- Estefen, S. F., Castello, X., Lourenço, M. I. & Rossetto, R. M. (2010). Design Analyses Applied to a Hyperbaric Wave Energy Converter. Proceedings 11th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures. Rio de Janeiro, Brasil.
- Falcão, A. F. O. & Henriques, J. C. C. (2016). Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renewable Energy*.
- Falcão, A. F. O., Henriques, J. C. C. & Gato, L. M. C. (2017). Rotational speed control and electrical rated power of an oscillating-water-column wave energy converter. *Energy*.
- Faj, F-X., Robles, E., Marcos, M., Aldaiturriaga, E. & Camacho, E.F. (2020). Sea trial results of a predictive algorithm at the Mutriku Wave power plant and controllers assessment based on a detailed plant model. *Renewable Energy*.

Félix, A., Hernández F., J.V., Lithgow, D., Mendoza, E., Posada, G., Ring, M. & Silva, R. (2019). Wave Energy in Tropical Regions: Deployment Challenges, Environmental and Social Perspectives. *Journal of Marine Science and Engineering*.

Fernández, S. (2017). Analizamos los datos de la Central Undimotriz de Mutriku. Producción, factor de capacidad, problemas. *DiarioRenovables*. Recuperado [19 de Febrero del 2021] desde: <https://www.diariorenovables.com/2017/12/central-undimotriz-de-mutriku-analisis-datos-produccion-problemas.html>

García C., E. (2020). Caracterización del potencial eólico marino en la Península de Yucatán [Webinar]. SISAL. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

García S, E. I. (2019). Potencial de la energía undimotriz en costas Mexicanas y usos potenciales. Tesis Doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

García S., E.I. (2014). Optimización de un dispositivo undimotriz de tipo boya flotante. Universidad Autónoma de México. Tesis de Maestría. México.

García, E., Correcher, A., Quiles, E. & Morant, F. (2016). Recursos y sistemas energéticos renovables del entorno marino y sus requerimientos de control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*.

Garduño R., E. P.; García H., A.; Rodríguez Cueto, Y.; Bárcenas G., J.F; Alatorre Mendieta, M.Á.; Cerezo A., E.; Tobal Cupul, J.G; Romero., V.M. & Silva C., R. (2017). Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC): Estado del Arte. CEMIE-Océano. Universidad Autónoma de Campeche. México.

Garrido, A.J., Otaola, E., Garrido, I., Lekube, J., Maseda, F.J., Liria, P. & Mader, J. (2015). Mathematical Modeling of Oscillating Water Columns Wave-Structure Interaction in Ocean Energy Plants. *Mathematical Problems in Engineering*.

Gastelum Z., L. (2017). Life Cycle Assessment of Wave Energy Converter. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.

Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J. V. Z. R. & Van Zelm, R. (2009). A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. The Hague, Ministry of VROM. ReCiPe

Grimaud, G., Perry, N. & Laratte, B. (2016). Life Cycle Assessment of Aluminium Recycling Process: Case of Shredder Cables. In Proceedings 23<sup>rd</sup> CIRP Conference on Life Cycle Engineering.

Grünwald, A.R. (2012). Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas. Universidad Politécnica de Cartagena. Colombia.

Guerrero H., C.J., (2001). Rocas calizas: Formación, ciclo del carbonato, propiedades, aplicaciones, distribución y perspectiva en la Mixteca Oaxaqueña. *Temas de Ciencia y Tecnología*.

Guezuraga, B., Zauner, R. & Pölz, W. (2012). Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. *Renewable Energy*.

- Haapala, K.R. & Prempreeda, P. (2014). Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. *International Journal of Sustainable Manufacturing*.
- Hammar, L., Gullström, M., Dahlgren, T.G., Asplund, M.E., Braga G., I. & Molander, S. (2017). Introducing ocean energy industries to a busy marine environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Hernández F., J.V., Félix, A., Mendoza, E., Rodríguez C., Y. & Silva, R. (2019). On the Marine Energy Resources of Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering*.
- Hernández F., J.V., Martínez, M.L., Wojtarowski, A., González M., J.L., Landgrave, R. & Silva, R. (2020). Is ocean energy an alternative in developing regions? A case study in Michoacan, Mexico. *Journal of Cleaner Production*.
- Hong, J., Chen, Y., Liu, j., Ma, X., Qi, C. & Ye, L. (2018). Life cycle assessment of copper production: a case study in China. *The International Journal of Life Cycle Assessment*.
- Hong, L. & Möller, B. (2011). Offshore wind energy potential in China: under technical, spatial and economic constraints. *Energy*.
- Huang, Y.F., Gan, X-J. & Chiueh, P-T. (2017). Life cycle assessment and net energy analysis of offshore wind power systems. *Renewable Energy*.
- Ibarra B., G., Sáenz, J., Ulazia, A., Serras, P., Esnaola, G. & García S., C. (2018). Electricity production, capacity factor, and plant efficiency index at the Mutriku wave farm (2014-2016). *Ocean Engineering*.
- IRENA. (2020). Estadísticas de Capacidad Renovable 2020. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi.
- ISO. (2006). ISO 14000/44 Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines. International organization for standardization.
- Jauregui, J. M., Haim, P. A., Lifschitz, A. J. & Pelissero, M. A. (2016). Análisis de los efectos ambientales de la generación de energía undimotriz en el puerto Quequén, provincia de Buenos Aires, República Argentina. *Proyecciones*.
- Ji, S., & Chen, B. (2016). Carbon footprint accounting of a typical wind farm in China. *Applied Energy*.
- Kaddoura, M., Tivander, J. & Molander, S. (2019). Life Cycle Assessment of Electricity Generation from an Array of Subsea Tidal Kite Prototypes. *Energies*.
- Kadiyala, A., Kommalapati, R. & Huque, Z. (2017). Characterization of the life cycle greenhouse gas emissions from wind electricity generation systems. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*.
- Kaldellis, J.K. & Apostolou, D. (2017). Life cycle energy and carbon footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart. *Renewable Energy*.

- Kaldellis, J.K., Apostolou, D., Kapsali, M. & Kondili, E. (2016). Environmental and social footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart. *Renewable Energy*.
- Karan, H. Thomson, R. & Harrison, G. (2019). Full life cycle assessment of two surge wave energy converters. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of Power and Energy.
- Larsen, K. (2009). Recycling wind turbines blades. *Renewable Energy Focus Magazine*.
- Lekube, J. (Marzo 2021). Comunicación Personal.
- Lekube, J., Ajuria, O., Ibeas, M., Igareta, I. & Gonzalez, A. (2018). Fatigue and Aerodynamic Loss in Wells Turbine: Mutriku Wave Power Plant Case. In Proceedings of the 7th International Conference on Ocean Energy. Cherbourg, France.
- Lenzen, M. & Munksgaard, J. (2002). Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines- review and applications. *Renewable Energy*.
- León, J. (Abril 2021). Comunicación Personal.
- Leung, D.Y.C, & Yang, Y. (2012). Wind energy development and its environmental impact: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Li, H., Jian, H-D., Dong, K-Y., Wei, Y-M. & Liao, H. (2020). A comparative analysis of the life cycle environmental emissions from wind and coal power: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*.
- Lieberei, J. & Gheewala, S.H. (2017). Resource depletion assessment of renewable electricity generation technologies- comparison of life cycle impact assessment methods with focus on mineral resources. *International Journal of Life Cycle Assessment*.
- López G., J., Hiriart Le Bert, G. & Silva C., R. (2010). Cuantificación de energía de una planta maremotriz. *Ingeniería, investigación y tecnología*.
- López, A., Somolinos, J. A. & Núñez, L. R. (2014). Modelado Energético de Convertidores Primarios para el Aprovechamiento de las Energías Renovables Marinas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*.
- Loza, B., Pacheco C. J., Cárdenas, D., Minchala, L.I. & Probst, O. (2019). Comparative Fatigue Life Assessment of Wind Turbine Blades Operating with Different Regulation Schemes. *Applied Sciences*.
- Luján O., C. C. (2014). Análisis de ciclo de vida de billetes mexicanos de polímero y papel de algodón de alta durabilidad. Tesis Maestría. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Lund, H. (2007). Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy*.
- Lundie, S., Wiedmann, T., Welzel, M. & Busch, T. (2019). Global supply chains hotspots of a wind energy company. *Journal of Cleaner Production*.

- Martin, R., Lazakis, I., Barbouchi, S. & Johanning, L. (2016). Sensitivity analysis of offshore wind farm operation and maintenance cost and availability. *Renewable Energy*.
- Martínez M., E., Rivas T., L.A. & Vera M., P.S. (2019). El sector eólico en México y España. *Perfiles latinoamericanos*.
- Mendoza, E., Lithgow, D., Flores, P., Felix, A., Simas, T. & Silva, R. (2019). A framework to evaluate the environmental impact of OCEAN energy devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Montero S., J.A. & Calvo, R., J.L. (2013). Energía maremotriz: perspectiva histórica y estado actual. *Revista Técnica Industrial*.
- Newlife MOTORS. (2013). Ficha técnica: HIDRALUB 900.
- Nugent, D. & Sovacool, B.K. (2014). Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey. *Energy Policy*.
- Oh, K.Y., Nam, W., Sung R., M., Kim, J.Y. & Epureanu, B.I. (2013). Preliminary evaluation of monopole foundation dimensions for an offshore wind turbine by analyzing hydrodynamic load in the frequency domain. *Renewable Energy*.
- Okuhara, S., Takao, M., Takami, A. & Setoguchi, T. (2013). Wells Turbine of Wave Energy Conversion-Improvement of the Performance by Means of Impulse Turbine of Bi-Directional Flow. *Open Journal of Fluid Dynamics*.
- Olivera, A., Cristobal, S. & Saizar, C. (2016). Análisis de ciclo de vida ambiental, económico y social: Una herramienta metodológica para la evaluación de impactos y soporte para la toma de decisiones. *Innotec gestión*.
- Olmez, G.M., Dilek, F.B., Karanfil, T. & Yetis, U. (2016). The environmental impacts of iron and steel industry: a life cycle assessment study. *Journal of Cleaner Production*.
- ONU. (2015). Objetivos del Desarrollo Sostenible. Recuperado [09 de Julio del 2020] desde: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Ortegon, K., Nies, L.F. & Sutherland, J.W. (2013). Preparing for end of service life of wind turbines. *Journal of Cleaner Production*.
- Otaola, E., Garrido, A.J., Lekube, J. & Garrido, I. (2019). A Comparative Analysis of Self-Rectifying Turbines for the Mutriku Oscillating Water Column Energy Plant. *Complexity*.
- Ozkan, C., Perez, K. & Mayo, T. (2020). The impacts of wave energy conversion on coastal morphodynamics. *Science of the Total Environment*.
- Panwar, N.L., Kaushik, S.C. & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Paredes, M. G., Padilla R., A. & Güereca, Leonor P. (2019). Life cycle assessment of ocean energy technologies: A systematic Review. *Journal of Marine Science and Engineering*.

- Parker, R. P. M., Harrison, G. P. & Chick, J. P. (2007). Energy and carbon audit of an offshore wave energy converter. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of Power and Energy. USA.
- Patrizi, N., Pulselli, R. M., Neri, E., Niccolucci, V., Vicinanza, D., Contestabile, P. & Bastianoni, S. (2019). Lifecycle environmental impact assessment of an overtopping wave energy convert embedded in breakwater systems. *Frontiers in Energy Research*.
- PE International Sustainability Performance. (2014). Best Practice LCA: End-of-Life Modelling [Webinar].
- Pehnt, M. (2006). Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies.. *Renewable Energy*.
- Pelissero, M., Haim, P. A., Oliveto, G., Galia, F. & Muiño, F. (2014). Descripción del dispositivo de aprovechamiento de la energía undimotriz. Parte II. *Proyecciones*.
- Pelissero, M., Haim, P. A., Oliveto, G., Galia, F. & Tula, R. (2011). Aprovechamiento de la Energía Undimotriz. *Proyecciones*.
- Pennoch, S., Vanegas C., M., Bloise T., T., Jeffrey, H. & Dickson, M.J. (2021). Life Cycle Assessment of a Point-Absorber Wave Energy Array. *Available at SSRN 3870980*.
- Perveen, R., Nand, K. & Mohanty, S.R. (2014). Off-shore wind farm development: Present status and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Piasecka, I., Tomporowski, A., Flizikowski, J., Kruszelnicka, W., Kasner, R. & Mroziński, A. (2019). Life Cycle Analysis of Ecological Impacts of an Offshore and Land-Based Wind Power Plant. *Applied Sciences*.
- Pinto, S. (2017). Análisis de ciclo de vida comparativo para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovable y convencional. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Pliego M., A., García M., F.P. & Pinar P., J.M. (2016). Optimal Maintenance Management of Offshore Wind Farms. *Energies*.
- Posso, F. (2002). Energía y ambiente; Pasado, Presente y Futuro. Parte dos: Sistema Energético basado en Energías Alternativas. *Geoenseñanza*.
- Raadal, L., Gagnon, L., Modahl, I.S. & Hanssen, O.J. (2011). Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Raadal, L., Vold, B.I., Myhr, A. & Nygaard, T.A. (2014). GHG emissions and energy performance of offshore wind power. *Renewable Energy*.
- Reimers, B., Özdirik, B. & Kaltschmitt, M. (2014). Greenhouse gas emissions from electricity generated by offshore wind farms. *Renewable Energy*.
- Romera L., A. (2010). Evaluación de Energía a media tensión en Parque Eólico Marino Piloto. Universidad Pontificia Comillas. España

Rule, B.M., Worth, Z.J. & Boyle, C.A. (2009). Comparison of Life Cycle Carbon Dioxide Emissions and Embodied Energy in Four Renewable Electricity Generation Technologies in New Zealand. *Environmental Science & Technology*.

Sánchez C., A. (2020). Desarrollo de las ecuaciones de diseño para un dispositivo WEC tipo columna oscilante. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Sánchez, C. F. (2017). Modelado y Análisis de Parques de Dispositivos Convertidores de Olas OWC para el Área de Ensayos BIMEP. Universidad del País Vasco. España.

Sanz, D. (2012a). Energías renovadas: componentes de un aerogenerador. Recuperado [26/12/2019] desde: <https://energiasrenovadas.com/categoria/energias-ecologicas/page/18/>

Sanz, D. (2012b). Energías Renovadas: central undimotriz en Brasil Recuperado [18/11/2020] desde: <https://energiasrenovadas.com/central-undimotriz-en-brasil/>

Schleisner, L. (2000). Life cycle assessment of a wind farm and related externalities. *Renewable Energy*.

Schreiber, A., Marx, J. & Zapp, P. (2019). Response to "Life-cycle green house gas emissions of onshore and offshore wind turbines. *Journal of Cleaner Production*.

SENER. (2015). Centros Mexicanos de Innovación en Energía. Recuperado [09 de Julio del 2020] desde: <https://www.gob.mx/sener/articulos/centros-mexicanos-de-innovacion-en-energia>

Serras, P., Ibarra B., G., Sáenz, J., Ulazia, A. (2019). Combining random forest and physics-based models to forecast the electricity generated by ocean waves: A case study of the Mutriku wave farm. *Ocean Engineering*.

Shadman, M., Silva, C., Faller, D., Wu, Z., de Freitas Assad, L. P., Landau, L., Levi, C. & Estefen, S. F. (2019). Ocean renewable energy potential, technology, and deployments: A case study of Brazil. *Energies*.

Silva, R. (2020). Taller transversal de trabajo del CEMIE-Océano para el desarrollo de indicadores de impacto de los dispositivos generadores de energía del océano y propuestas de regulación ambiental. Del 13 al 17 de enero de 2020. Instituto de Ingeniería de la UNAM. Ciudad de México. México.

Simon, P. (2015). Assessment of Embodied Energy and Carbon Emissions of the Swansea Bay Tidal Lagoon from a Life Cycle Perspective. Master's Thesis. Department of Ecotechnology and Sustainable Building Engineering. Mid Sweden University. Östersund, Switzerland.

Soltanmohamadi, R. & Lakzian, E. (2016). Improved design of Wells turbine for wave energy conversion using entropy generation. *Meccanica*.

Sonnemann, G. & Vigon, B. (2011). Global guidance principles for Life Cycle Assessment (LCA) databases: a basis for greener processes and products.

Sørense, H. C., Naef, S., Anderberg, S. & Hauschild, M. Z. (2006). Life cycle assessment of the wave energy converter: Wave Dragon. In Proceedings of the International Conference on Ocean Energy. Bremerhaven, Alemania.

Sørensen, J.D. (2009). Framework of risk-based planning of operation and maintenance for offshore wind turbines. *Wind Energy*.

Stafford, F.N., Raupp-Pereira, F., Labrincha, J.A. & Hotza, D. (2016). Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. *Journal of Cleaner Production*.

Sun, X., Huang, D., & Wu, G. (2012). The current state of offshore wind energy technology development. *Energy*.

Taormina, B., Bald, J., Want, A., Thouzeau, G., Lejart, M., Desroy, N. & Carlier, A. (2018). A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Tease, W. K., Lees, J. & Hall, A. (2007). Advances in Oscillating Water Column Air Turbine Development. In Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference.

Tello M., J., & Marulanda G., A. (2017). Modelo de optimización para sistemas de potencia en la evolución hacia redes inteligentes: Una revisión. *DYNA*.

Thomson, R. C., Chick, J. P. & Harrison, G. P. (2019). An LCA of the Pelamis wave energy converter. *The International Journal of Life Cycle Assessment*.

Thomson, R. C., Harrison, G. P. & Chick, J. P. (2011). Full life cycle assessment of a wave energy converter. In Proceedings of the IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011). Edingburgh, UK.

Tomporowski, A., Flizikowski, J., Opielak, M., Kasner, R., & Kruszelnicka, W. (2012) Assessment of energy use and elimination of CO<sub>2</sub> emission in the life cycle of an offshore wind power plant farm. *Renewable. Polish Maritime Research*.

Topham, E., McMillan, D., Bradley, S., & Hart, E. (2019). Recycling offshore wind farms at decommissioning stage. *Energy Policy*.

Torre-Enciso, Y., Marqués, J. & López de Aguilera, L.I. (2010). Mutriku: Lessons learnt. In Proceedings of the 3rd International Conference on Ocean Energy. Bilbao, España.

Torre-Enciso, Y., Ortubia, I., López de Aguilera, L.I. & Marqués, J. (2009). Mutriku Wave Power Plant: from the thinking out to the reality. In Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference. Uppsala, Sweden.

Tremeac, B. & Meunier, F. (2009). Life cycle analysis of 4.5 MW and 250 W wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Uihlein, A. (2016). Life cycle assessment of ocean energy technologies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*

- Valdez, P., Tula, R., Pelissero, M. & Haim., A. (2015). Simulaciones de fluidos con CFD aplicadas a interpretar el aprovechamiento de la energía renovable oceánica. *TRIM: revista de investigación multidisciplinar*.
- Vargas, A.V., Zenón, E., Oswald, U., Islas, J.M, Güereca, L.P. & Manzini, F.L. (2015). Life cycle assessment: A case study of two wind turbines used in Mexico. *Applied Thermal Engineering*.
- Vestas. (2007). Life Cycle Assessment of offshore and onshore sited wind farms.
- Wagner, H.J., Baack, C., Eickelkamp, T., Epe, A., Lohmann, J. & Troy, S. (2011). Life cycle assessment of the offshore wind farm alpha ventas. *Energy*.
- Walker, S. & Howell, R. (2011). Life Cycle Comparison of a Wave and Tidal Energy Device. University of Sheffield. Sheffield, UK.
- Walker, S., Howell, R., Hodgson, P. & Griffin, A. (2015). Tidal energy machines: A comparative life cycle assessment study. *Journal of Engineering for the Maritime Environment*.
- Wang, S., Wang, S. & Liu, J. (2019). Life-cycle green-houses gas emissions of onshore and offshore wind turbines. *Journal of Cleaner Production*.
- Wang, W.C. & Teah, H.Y. (2017). Life cycle assessment of small-scale horizontal axis wind turbines in Taiwan. *Journal of Cleaner Production*.
- Wang, Y. & Sun, T. (2012). Life cycle assessment of CO<sub>2</sub> emissions from wind power plants: Methodology and case studies. *Renewable Energy*.
- Weinzettel, J., Reenaas, M., Solli, C. & Hertwich, E.G. (2009). Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine. *Renewable Energy*.
- Wiedmann, T.O., Suh, S., Feng, K., Lenzen, M., Acquaye, A., Scott, K. & Barrett, J.R. (2011). Application of Hybrid Life Cycle Approaches to Emerging Energy Technologies - The Case of Wind Power in the UK. *Environmental Science & Technology*.
- Wilberforce, T., El Hassan, Z., Durrant, A., Thompson, J., Soudan, B. & Olabi, A.G. (2019). Overview of ocean power technology. *Energy*.
- Wu, J., Wang, Z.X. & Wang, G.Q. (2014). The key techology and development of offshore wind farm in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Yang, J., Chang, Y., Zhang, L., Hao, Y., Yan, Q. & Wang, C. (2018). The life-cycle energy and environmental emissions of a typical offshore wind farm in China. *Journal of Cleaner Production*.
- Zamorano G., S.A. (2019). Evaluación de los impactos ambientales de sistemas de generación de energía del océano. Tesis Maestría. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma de México. México.
- Zhai, Q., Zhu, L. & Lu., S. (2018). Life Cycle Assessment of a Buoy-Rope-Drum Wave Energy Converter. *Energies*.

Zhang, X., Zhang, L., Yuan, Y. & Zhai, Q. (2020). Life Cycle Assessment on Wave and Tidal Energy Systems: A Review of Current Methodological Practice. *International Journal of Environmental Research and Public Health*.

Zhao, X., Liu, S., Yan, F., Yuan, Z., & Liu, Z. (2017). Energy conservation, environmental and economic value of the wind power priority dispatch in China. *Renewable Energy*.

Zhixin, W., Chuanwen, J., Quian, A., & Chengming, W. (2009). The key technology of offshore wind farm and its new development in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.