



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

**EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE SISTEMAS DE  
GENERACIÓN DE ENERGÍA DEL OCÉANO**

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

PRESENTA:  
I.C. ZAMORANO GUZMÁN SERGIO AGUSTÍN

TUTOR PRINCIPAL  
DRA. LEONOR PATRICIA GÚERCA HERNÁNDEZ, II UNAM

COMITÉ TUTOR  
DR. RODOLFO SILVA CASARÍN, II UNAM  
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN, II UNAM

Ciudad Universitaria, CD. MX. septiembre 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Dra. Ma. Guadalupe Paredes Figueroa

**Secretario:** Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

**Vocal:** Dr. Enrique César Valdez

**1<sup>er</sup>. Suplente:** Dr. Rodolfo Silva Casarín

**2<sup>do</sup>. Suplente:** Dra. Leonor Patricia Güereca Hernández

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

**TUTOR DE TESIS:**

Dra. Leonor Patricia Güereca Hernández

-----  
**FIRMA**

## AGRADECIMIENTOS

Esta tesis fue financiada por el Fondo CONACYT-SENER / Sustentabilidad Energética a través del Centro Mexicano de Innovación en Energías del Océano (CEMIE-Océano), número de subvención 249795. Adicionalmente, los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca de maestría otorgada a Sergio Agustín Zamorano Guzmán.

Agradezco a mi familia y amigos por el apoyo otorgado durante este proceso. También agradezco a la Dra. Leonor Patricia Güereca por recibirme en su grupo de trabajo, a mis compañeros del Instituto de Ingeniería, y al comité tutorial por los consejos y apoyo brindado.

## CONTENIDO

1. Introducción .....	12
2. Marco teórico .....	13
2.1. Energías del océano .....	13
2.1.1. Corrientes y mareas .....	14
2.1.2. Gradiente térmico .....	16
2.1.3. Gradiente salino .....	19
2.2. Evaluación de Impacto ambiental de energías del océano .....	21
2.3. Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	23
2.3.1. Etapas del Análisis de Ciclo de Vida.....	23
2.4. ACV de energías del océano.....	24
2.5. Justificación del proyecto .....	26
2.6. Objetivo .....	27
2.6.1. Objetivos particulares .....	28
3. Metodología .....	28
3.1. Función del sistema y unidad funcional.....	28
3.2. Límites del sistema .....	29
3.2.1. Etapas consideradas en la modelación de los sistemas .....	29
3.3. Descripción de los sistemas .....	31
3.3.1. OTEC CC (Ciclo Cerrado).....	31
3.3.2. Gradiente salino .....	32
3.3.3. Corrientes de marea y marinas.....	33
3.4. Metodología de Evaluación de Impactos .....	35
3.5. Selección de Categorías de Impacto.....	35
3.6. Inventarios Ciclo de Vida .....	38
3.6.1. Inventario OTEC CC.....	38
3.6.1.1 Análisis de Inventario del dispositivo OTEC CC.....	44
3.6.2. Inventario del dispositivo de corrientes de marea SeaGen.....	45
3.6.2.1. Análisis de Inventario del dispositivo SeaGen .....	48
3.6.3. Inventario del dispositivo de corrientes marinas Hidrogenerador IMPULSA .....	49
3.6.3.1. Análisis de Inventario del dispositivo de corrientes marinas Hidrogenerador IMPULSA 50	
3.6.4. Inventario del dispositivo de Gradiente Salino por electrodiálisis inversa (RED).....	51
3.6.4.1. Análisis de inventario del dispositivo de Gradiente Salino RED.....	53
3.6.5. Mix eléctrico mexicano.....	54
4. Resultados Y DISCUSIÓN.....	55
4.1. ANALISIS GENERAL.....	55

4.1.1.	OTEC CC.....	57
4.1.2.	Gradiente Salino.....	59
4.1.3.	Corrientes marinas y de marea.....	59
4.2.	Evaluación de impacto por categoría.....	61
4.2.1.	Cambio Climático (CC).....	61
4.2.2.	Agotamiento de Combustibles Fósiles (ACF).....	66
4.2.3.	Toxicidad Humana (TH).....	69
4.2.4.	Ecotoxicidad Marina (ETM). ....	72
4.2.5.	Eutrofización Marina (EM).....	75
4.2.6.	Agotamiento de recursos minerales (AM).....	79
4.2.7.	Agotamiento de la capa de Ozono (AO).....	83
4.2.8.	Formación de Materia Particulada (FMP).....	88
4.2.9.	Acidificación (A).....	91
5.	Análisis de sensibilidad.....	94
6.	Conclusiones.....	100
	Referencias.....	102
	Anexo A. Categorías de Impacto.....	112
	Cambio Climático.....	112
	Agotamiento de ozono.....	112
	Acidificación.....	113
	Eutrofización Marina.....	114
	Toxicidad Humana y eco toxicidad marina.....	115
	Formación de materia particulada.....	115
	Agotamiento de Recursos Minerales.....	116
	Agotamiento de combustibles fósiles.....	117
	ANexo B. Resultados.....	118
	VALORES DEL MIX ELECTRICO MÉXICANO.....	118
	Resultados sistema OTEC CC.....	118
	Resultados del Hidrogenerador IMPULSA.....	121
	Resultados del generadro SeaGen.....	123
	REsultados del dispositivo de gradiente salino (RED).....	125

## FIGURAS

Figura 1. a) Turbina de eje horizontal, b) Turbina de eje vertical (Adaptado a partir de Student Energy, 2015).	15
Figura 2. Hidrogenerador IMPULSA de la UNAM (Mariño et al., 2017).	16
Figura 3. Sistema de energía del Ciclo Abierto (OC) de OTEC (Fernández, 2008).	17
Figura 4. Sistema de ciclo cerrado (CC) de OTEC (Fernández, 2008).	18
Figura 5. Funcionamiento del ciclo mixto de OTEC (Terry de Loredo, 2018).	19
Figura 6. Sistema de presión osmótica retardada (Bernal, 2016).	20
Figura 7. Sistema de electrodiálisis inversa (Bijmans et al., 2012).	20
Figura 8. Etapas del ACV (ISO 14040, 2006).	24
Figura 9. Pasos a seguir durante la metodología.	28
Figura 10. Límites del sistema considerados para los dispositivos de generación de energía.	29
Figura 11. Estructura de la etapa de construcción para la modelación de los dispositivos analizados.	30
Figura 12. Estructura del intercambiador de calor propuesto por George et al. (1979).	32
Figura 13. Estructura de la Pila utilizada para el ACV del dispositivo de gradiente salino (Veerman et al., 2010).	33
Figura 14. Generador SeaGen (Douglas et al., 2008).	34
Figura 15. Estructura del Hidrogenerador IMPULSA (López, 2011).	34
Figura 16. Proporción de los materiales utilizados para la construcción del dispositivo OTEC CC.	45
Figura 17. Utilización de materiales para la fabricación del generador SeaGen.	49
Figura 18. Materiales utilizados en la fabricación del Hidrogenerador IMPULSA.	51
Figura 19. Utilización de materiales para la fabricación del dispositivo de gradiente salino RED.	54
Figura 20. Impactos normalizados para los cuatro sistemas.	56
Figura 21. Impactos normalizados para el sistema OTEC CC.	58
Figura 22. Impactos normalizados para la etapa de construcción del sistema OTEC CC.	58
Figura 23. Impactos normalizados para el sistema de Gradiente Salino RED, a) resultados porcentuales para las etapas de construcción y fin de vida y b) resultados porcentuales para la etapa de construcción.	59
Figura 24. Impactos normalizados para el Hidrogenerador IMPULSA, a) resultados porcentuales para las etapas de construcción y fin de vida, b) resultados porcentuales para la etapa de construcción.	60
Figura 25. Impactos normalizados para el generador SeaGen, a) valor porcentual en las etapas de construcción y fin de vida, b) valor porcentual en la etapa de construcción.	60
Figura 26. Categoría de Impacto de Cambio Climático para los 4 sistemas evaluados.	61
Figura 27. Valores de impacto de la categoría de Cambio Climático para el sistema OTEC CC.	63
Figura 28. Valores de Impacto en la categoría de Cambio Climático para la etapa de construcción del sistema OTEC CC.	64
Figura 29. Valores de Impacto de la categoría de Cambio Climático para el sistema de Gradiente Salino RED.	65
Figura 30. Valores de impacto para la categoría de Cambio Climático para el Hidrogenerador IMPULSA.	65
Figura 31. Valores de Impacto para la categoría de Cambio Climático para el sistema SeaGen.	66
Figura 32. Valores de Impacto para la categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles para los cuatro sistemas analizados.	67
Figura 33. Valores de Impacto para la categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles para el Hidrogenerador IMPULSA.	68
Figura 34. Valores de Impacto para la categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles para el sistema SeaGen.	68

Figura 35. Valores de Impacto para la categoría de Toxicidad Humana para los cuatro sistemas analizados.....	69
Figura 36. Valores de Impacto para la categoría de Toxicidad Humana en la etapa de Construcción del sistema OTEC CC.....	71
Figura 37. Valores de Impacto para la categoría de Toxicidad Humana del Hidrogenerador IMPULSA.....	71
Figura 38. Valores de impacto para la categoría de Ecotoxicidad Marina.....	72
Figura 39. Valores de Impacto para la categoría de Ecotoxicidad Marina en la etapa de Construcción del Hidrogenerador IMPULSA.....	73
Figura 40. Valores de Impacto para el sistema de Gradiente Salino RED.....	74
Figura 41. Valores de impacto para la categoría Ecotoxicidad marina del sistema OTEC CC en su etapa de construcción.....	75
Figura 42. Valores de impacto para la categoría de Eutrofización Marina para los cuatro sistemas evaluados en este trabajo.....	76
Figura 43. Valores de Impacto para la categoría de Eutrofización Marina para el sistema de Gradiente Salino RED.....	77
Figura 44. Valores de Impacto para la categoría de Eutrofización Marina para el sistema OTEC CC. ....	77
Figura 45. Valores de Impacto para la categoría de Eutrofización Marina para la etapa de construcción del sistema OTEC CC.....	78
Figura 46. Valores de Impacto para la categoría de Eutrofización Marina para el Hidrogenerador IMPULSA.....	79
Figura 47. Valores de Impacto para la categoría de Agotamiento de recursos Minerales para los cuatro sistemas estudiados.....	80
Figura 48. Valor de Impacto para la categoría de Agotamiento de recursos Minerales del Hidrogenerador IMPULSA.....	81
Figura 49. Valores de Impacto para la categoría de Agotamiento de recursos Minerales para el sistema OTEC CC.....	82
Figura 50. Valor de Impacto para la categoría de Agotamiento de recursos Minerales para el sistema de Gradiente Salino RED.....	82
Figura 51. Valor de Impacto para la categoría de Agotamiento de recursos Minerales para el generador SeaGen.....	83
Figura 52. Categoría de Impacto de Agotamiento de Ozono para los cuatro sistemas evaluados.....	84
Figura 53. Categoría de Impacto de Agotamiento de Ozono para el sistema OTEC CC.....	85
Figura 54. Categoría de Impacto de Agotamiento de Ozono para la etapa de construcción del sistema OTEC CC.....	85
Figura 55. Categoría de impacto de Agotamiento de Ozono para el sistema de Gradiente Salino RED. ....	86
Figura 56. Categoría de Impacto de Agotamiento de Ozono para el Hidrogenerador IMPULSA. ....	87
Figura 57. Categoría de Impacto de agotamiento de Ozono para el sistema SeaGen.....	87
Figura 58. Valores de la categoría de impacto de Formación de Materia Particulada. ....	88
Figura 59. Categoría de Impacto de formación de materia particulada para el Hidrogenerador IMPULSA.....	89
Figura 60. Categoría de Formación de Materia Particulada para el sistema OTEC CC.....	90
Figura 61. Categoría de Formación de Materia Particulada para el generador SeaGen.....	91
Figura 62. Categoría de Acidificación para los cuatro sistemas analizados en este trabajo. ....	91
Figura 63. Categoría de Impacto de Acidificación para el Hidrogenerador IMPULSA.....	93
Figura 64. Categoría de Impacto de Acidificación para el sistema OTEC CC.....	94
Figura 65. Densidad de poder $\rho$ para diferentes fluidos de trabajo (Berdarmoni et al., 2019). ....	95
Figura 66. Categorías de Impacto de Cambio Climático y Agotamiento de Combustibles Fósiles para tres escenarios OTEC CC.....	96

Figura 67. Categorías de Impacto de Toxicidad humana y Ecotoxicidad Marina para tres escenarios de OTEC CC.....	96
Figura 68. Categorías de Impacto de Eutrofización Marina y Agotamiento de recursos Minerales para tres escenarios OTEC CC.....	97
Figura 69. Categorías de Impacto de Agotamiento de Ozono y Formación de Materia Particulada para tres escenarios OTEC CC.....	97
Figura 70. Categoría de Acidificación para tres escenarios OTEC CC.....	97
Figura 71. Rutas de emisiones y descargas utilizadas por CARMEN.....	114

## TABLAS

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos en este trabajo. ....	11
Tabla 2. Trabajos publicados sobre evaluación de impactos ambientales de dispositivos de generación de energía del océano.....	21
Tabla 3. Trabajos publicados sobre ACV de energías del océano. ....	25
Tabla 4. Procesos de disposición final utilizados para los diferentes materiales utilizados en la modelación de los sistemas .....	31
Tabla 5. Categorías de impacto a punto medio utilizadas en la metodología ReCiPe (Goedkoop, 2009). ....	36
Tabla 6 Categorías de impacto utilizadas en ACV de energías del océano. ....	37
Tabla 7. Categorías de impacto de la metodología ReCiPe empleadas en el presente trabajo. ....	38
Tabla 8. Tabla de datos del sistema OTECC CC.....	39
Tabla 9. Inventario dispositivo OTEC CC.....	39
Tabla 10. Materiales utilizados en la fabricación del dispositivo OTEC CC.....	44
Tabla 11. Tabla de datos del sistema de corrientes de marea SeaGen.....	45
Tabla 12. Inventario dispositivo SeaGen .....	45
Tabla 13. Materiales utilizados para la fabricación del dispositivo SeaGen .....	49
Tabla 14. Tabal de datos sistema de corrientes marinas Hidrogenerador IMPULSA.....	49
Tabla 15. Inventario del dispositivo Hidrogenerador IMPULSA.....	50
Tabla 16. Materiales utilizados en la Fabricación del Hidrogenerador IMPULSA. ....	51
Tabla 17. Tabla de datos del sistema de Gradiente Salino RED.....	51
Tabla 18. Inventario del dispositivo de Gradiente Salino RED .....	52
Tabla 19. Materiales utilizados en la fabricación del dispositivo de Gradiente Salino RED.....	54
Tabla 20. Valores para la categoría de impacto de Cambio Climático, para diferentes sistemas de generación de energía a partir del océano, reportados en diferentes fuentes.....	62
Tabla 21. Valores presentados para otros sistemas de generación de energía del océano para la categoría de toxicidad humana en otras fuentes.....	70
Tabla 22. Valores presentados para otros sistemas de generación de energía del océano para la categoría de ecotoxicidad marina en otras fuentes.....	72
Tabla 23. Valores de otros sistemas de generación de energía a aprtir del océano para la categoría de eutrofización marina. ....	76
Tabla 24. Valores presentados por otros sistemas en la literatura para la categoría de agotamiento de recursos minerales.....	80
Tabla 25. Valores reportados para otros sistemas de generación de energía a partir del océano para la categoría de agotamiento de ozono. ....	84
Tabla 26. Valores para otros sistemas de generación de energía del océano en la categoría de formación de materia aprticulada.....	88
Tabla 27. Valores para sistemas de generación de energía del océano en la literatura, para la categoria de acidificación. ....	92
Tabla 28. Equivalencias de fluidos de trabajo obtenidas empleando la información publicada por Berdarnoni et al. (2019) .....	96

Tabla 29. Características de diferentes refrigerantes (Maina et al., 2015). .....	99
Tabla 30. Valores para el mix eléctrico mexicano, obtenido de la base de datos Ecoinvent3.4.....	118
Tabla 31. Resultados para el sistema OTEC CC con amoníaco en la etapa de construcción.....	118
Tabla 32. Resultados para el dispositivo OTEC CC con amoníaco en su etapa de generación. ....	120
Tabla 33. Resultados para el dispositivo OTEC CC con amoníaco en su etapa de fin de vida. ....	120
Tabla 34. Resultados del hidrogenerador IMPULSA en la etapa de construcción. ....	121
Tabla 35. Resultados del Hidrogenerador IMPULSA en su etapa de fin de vida. ....	122
Tabla 36. Resultados del generador SeaGen en su etapa de construcción. ....	123
Tabla 37. Resultados del generador SeaGen en su etapa de fin de vida. ....	124
Tabla 38. Resultados del dispositivo de gradiente salino (RED) en la etapa de construcción. ....	125
Tabla 39. Resultados del dispositivo de gradiente salino (RED) en su etapa de fin de vida.....	126

# RESUMEN

En la búsqueda de nuevos sistemas de generación de energía renovable que sustituyan a los que utilizan combustibles fósiles, las energías a partir del océano aparecen mostrando su capacidad de satisfacer la creciente necesidad energética.

En México, CONACYT y la SENER han tomado interés en el desarrollo de tecnología y capital humano en relación a las energías renovables, por lo que se han creado los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIE) enfocados a diferentes fuentes de energía renovable, entre ellos CEMIE-Océano se encarga del desarrollo científico y tecnológico de los sistemas de energía asociados al océano.

Existen diversas formas de obtención de energía a partir del océano, al explotar las olas, las corrientes oceánicas, las mareas y los gradientes térmicos y de salinidad. Se busca revisar si estos sistemas realmente se pueden considerar de menor impacto ambiental que los sistemas convencionales de generación de energía.

Para hacerlo, se propone la utilización de la evaluación de impactos ambientales con enfoque de Análisis de Ciclo de vida, que es una herramienta holística que permite evaluar los impactos ambientales producidos por un sistema o producto desde la obtención de sus materiales, hasta su disposición final, incluyendo toda la vida útil del sistema o producto.

En este trabajo se planteó evaluar el impacto de 4 dispositivos, que utilizan diferentes fuentes de energía. Estos sistemas son: sistema OTEC de ciclo cerrado (conversión de energía térmica del océano), sistema de gradiente salino por electrodiálisis inversa, corrientes oceánicas y corrientes de marea.

Se consideró también utilizar la metodología ReCiPe para la evaluación de los impactos, evaluando 9 categorías de impacto; cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, agotamiento de combustibles fósiles, formación de materia particulada, acidificación, toxicidad humana, ecotoxicidad marina, eutrofización marina y agotamiento de metales, por considerarlas representativas de los sistemas.

Se encontró que, de forma general, los impactos de los sistemas de generación a partir del océano presentan menores impactos que el sistema convencional de generación de energía en México, además de presentar impactos comparables con otros sistemas de generación de energía del océano.

Aun así, cada uno de los sistemas presentó mayores impactos en categorías específicas, como se revisa en la tabla 1.

**Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos en este trabajo.**

Dispositivo	Sensibilidad	Unidad Funcional	Tiempo de vida (años)	Generación kW	Resultados
OTEC CC	Amoniaco. R-152a, R-134a	1 kWh	3.00E+01	5.00E+04	El amoniaco, por un lado, es una de las sustancias con mejor desempeño en estos sistemas, lo que reduce las cantidades a utilizar y además es una sustancia con lineamientos de manejo industrial mejor establecidos que otras sustancias, aunque es bien conocido como una sustancia altamente toxica, cuya liberación al ambiente podría traer consecuencias desastrosas. La búsqueda de otros fluidos de trabajo no debe pasar por alto los impactos asociados a la fabricación de dicho fluido, además de los impactos asociados por posibles emisiones directas. Aunque por el momento las eficiencias alcanzadas por otros refrigerantes son menores, es importante el esfuerzo en la búsqueda de refrigerantes sustitutos, que podría llegar a la revisión del CO2 como fluido de trabajo en estos sistemas.
Gradiente salino RED	No	1 kWh	3.00E+01	2.00E+02	Gradiente salino presentó valores más altos que el método convencional de generación eléctrica en la categoría de eutrofización marina. En comparación con los otros sistemas, además de eutrofización marina, resalta su impacto en la categoría de agotamiento de combustibles fósiles, pues las membranas requieren productos derivados del petróleo. Tiene un menor impacto que el Hidrogenerador IMPULSA y OTEC CC en cambio climático y toxicidad humana, y es el dispositivo de menor impacto en las categorías de recursos minerales y acidificación.
Hidrogenerador IMPULSA	No	1 kWh	1.00E+01	5.00E-01	El principal problema con el hidrogenador IMPULSA es su baja capacidad de generación y tiempo de vida reducidos, lo que tiene como resultado que sus impactos sean, en general, mayores en comparación con los otros dispositivos. Esto es debido a que es un sistema de pruebas, por lo que se espera que su escalamiento comercial tenga asociada un aumento de estas características, por lo que sus impactos se reducirían. Aun así, su impacto respecto a la producción convencional de energía es menor en la mayoría de los casos, exceptuando la categoría de agotamiento de recursos minerales, por lo que la utilización de materiales reciclados podría contribuir a una reducción del impacto.
SeaGen	No	1 kWh	20	1.20E+03	El generador SeaGen ha demostrado en este estudio, y en otros, ser uno de los sistemas de energía renovable con menores impactos asociados. Tiene mayor participación en categorías de impacto como toxicidad humana, acidificación y agotamiento de recursos minerales, donde supera a los sistemas OTEC CC y de gradiente salino RED.

# 1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población, el crecimiento industrial y socioeconómico alrededor del mundo han mantenido en incremento la demanda de energía. En 2016, a nivel mundial, se registró un crecimiento del 1% en el consumo energético, mientras que en 2017 se registró un consumo de 2.2% y se considera un crecimiento promedio de 1.7% anual durante los últimos 10 años (BP, 2018).

Hasta ahora, los combustibles fósiles convencionales son los más utilizados como fuente de energía, representando aproximadamente el 90% del total empleado, de los cuales los más consumidos son el petróleo y el carbón (IEA, 2016).

El uso de combustibles fósiles presenta un reto en cuanto al suministro en existencia, pues al ser fuentes no renovables de energía, la cantidad disponible para su utilización disminuye, limitándolos como una fuente que pueda satisfacer las necesidades crecientes de consumo energético mundial, por lo que prolongar su uso puede generar conflictos en los ámbitos económico y político a nivel internacional.

Para el petróleo, por ejemplo, en 1949, Hubbert demostró que la evolución de la explotación de cualquier pozo petrolero sigue una curva en forma de campana, donde, a partir del punto máximo de extracción, el petróleo empieza a escasear. De manera global, se consideró que el punto máximo se alcanzaría en los años 2000, presentándose en tiempos variados de forma específica para diferentes países.

Así mismo, con base a World Factbook de la Agencia Central de Inteligencia de los Estados Unidos, CIA, (2017), donde se consideran las reservas conocidas hasta entonces (1.665 billones de barriles) y la producción de refinados diaria del petróleo (87.69 millones de barriles), se puede estimar que la duración de dichas reservas es aproximadamente de 52 años.

Adicionalmente, a los combustibles fósiles se les puede asociar a diversas problemáticas de carácter ambiental, no solo en su uso, sino también en su extracción y producción, siendo una de las más importantes el Cambio Climático, además de otros problemas asociados, la lluvia ácida, acidificación de los océanos y contaminación de suelos y cuerpos de agua (López et al., 2011).

Es por esto que las fuentes de energía renovable han tomado un papel importante para una transición energética que permita atender la demanda de energía, reduciendo la preocupación por la disponibilidad de la fuente, y eventualmente reduciendo impactos ambientales.

Entre el 2014 y 2015, el uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica en países de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, por sus siglas en inglés) presentó una reducción del 7.6% para carbón y del 10.6% para petróleo, mientras que se registró un aumento en el uso de energías renovables, siendo el crecimiento más importante para el uso de la energía solar con un 17.8%, 16% para la generación por energía eólica y 2.5% para biocombustibles (IEA, 2016). En 2014 la producción eléctrica por fuentes renovables, incluyendo la energía solar, eólica y por marea fue del 4.2% (IEA, 2016).

Para México, el cenit de extracción de petróleo se habría presentado en los años 90's. Aun así, las fuentes de generación de energía más utilizada en México siguen siendo los combustibles fósiles. Para la generación de electricidad, el gas natural es la fuente más usada, seguido por el petróleo, el carbón y la generación hidroeléctrica (SENER, 2013).

En 2014, de 301.5 TWh producidos en México, 250.6 TWh fueron producidos por combustibles fósiles, mientras que la energía geotérmica, solar y eólica generaron en conjunto 14.44 TWh, sin contar con registro de participación por parte de fuentes relacionadas al océano (IEA, 2016).

En la última década el uso de fuentes renovables de energía en México tuvo un aumento del 4.3% anual, mientras que la generación por tecnologías termoeléctricas convencionales se redujo 1% anual. Se prevé que entre 2017 y 2031 se logre una adición en la capacidad de generación eléctrica, en la cual el 62.6% sea por parte de fuentes renovables (SENER, 2017).

Una de las fuentes de energía renovables en la que se está invirtiendo actualmente es el océano. Se considera que la conversión de energía del océano tiene el potencial de satisfacer las necesidades energéticas del presente, además de ser una de las fuentes con gran capacidad para ser aprovechada y adaptada (Energy, 2014; Bruciaga y Escobar, 2016).

El océano es un gran reservorio de energía producida por el Sol. Por lo que se considera factible la extracción de energía mientras que existan el océano y el Sol. Una de las características que hace atractivas a las fuentes de energía provenientes del océano es el potencial de reducir los impactos por la emisión de gases de efecto invernadero (Khan et al., 2017).

La mayoría de las tecnologías para el aprovechamiento de la energía del océano se encuentran en etapas tempranas, lo que deja ver varias desventajas en comparación con fuentes de energía de mayor uso. Un ejemplo es el factor económico, pues, dado que no existe un mercado de energías del océano, el costo para el desarrollo de la tecnología necesaria y su implementación es elevado (Energy, 2014).

Otra desventaja, es la escasa información que se tiene sobre los impactos ambientales asociados a los sistemas de generación de energía del océano respecto a otros sistemas convencionales, por lo que es necesaria una herramienta que permita dicha evaluación.

En este sentido, el Análisis de Ciclo de Vida, (ACV) es una metodología holística, que permite la evaluar los impactos ambientales asociados a un producto, proceso o actividad, a través de su ciclo de vida. Permitiendo una comparación con productos o procesos que cumplen con la misma función. Además, permite la identificación de oportunidades de mejora respecto al desempeño ambiental de los productos, permite la toma de decisiones informada en industria y organizaciones gubernamentales y privada (ISO, 2006). Por lo antes mencionado, se ha planteado utilizar el Análisis de Ciclo de Vida para evaluar el desempeño ambiental de sistemas de generación a partir del océano.

## 2. MARCO TEÓRICO

Si bien, las tecnologías de conversión de energía del océano tienen el potencial para ayudar a reducir diferentes riesgos ambientales, no están exentas de producir, ellas mismas, impactos ambientales (Pelc y Fujita., 2002). Se presenta a continuación el estado actual de las tecnologías en las que se centra este estudio y como han procedido hasta ahora la evaluación de impactos ambientales.

### 2.1. ENERGÍAS DEL OCÉANO

El Sol provee cerca del 99.99 % de la energía en la tierra y los océanos, que, a través de distintos fenómenos, son participes de ésta. Dado que los océanos cubren aproximadamente el 70% del planeta (Khan et. al, 2017), funcionan como un almacén gigante de la energía irradiada por el Sol. Además, las olas son producto de la acción de los vientos, generados por la actividad atmosférica y la radiación solar, sobre el océano; el efecto gravitacional producido entre la tierra, la luna, y el Sol tiene como consecuencia la formación de mareas. Dependiendo el fenómeno, la tecnología de conversión será diferente. Algunos de los ejemplos de energías del océano y sus sistemas de conversión son: la energía

de las olas o undimotriz con los sistemas WEC (Wave Energy Conversion) (Thomson, 2019); la energía mareomotriz aprovechada, a partir de embalses (Pelc y Fujita., 2002); las corrientes de marea y oceánicas a través de sistemas como los TSG (Tidal Stream Generation, por sus siglas en inglés) (Blunden et al., 2007) y los generadores de corrientes oceánicas (CEMIE-Océano, 2017); a los sistemas que aprovechan el gradiente térmico de los océanos se les conoce como OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion, por sus siglas en inglés) (Aalbers, 2015) y los sistemas que aprovechan el gradiente de salinidad pueden utilizar sistemas RED (Reversed Electro Dialysis, por sus siglas en inglés) si utilizan electrodiálisis inversa, o PRO (Pressure-Retarded Osmosis, por sus siglas en inglés), si utiliza osmosis por presión retardada (CEMIE Océano, 2017). Aunque no directamente enfocadas en el océano, se suele considerar también a la energía eólica fuera de costa y a los combustibles producidos por biomasa marina.

Cada uno de estos fenómenos representa una oportunidad de explotación de energías renovables, sin embargo, actualmente la energía proveniente del océano no es representativa en el suministro energético (IEA, 2016).

El desarrollo de tecnologías para la conversión de energías del océano se encuentra en una etapa temprana, aunque se espera que el crecimiento sea rápido. Hay diversas barreras a superar para este campo no solo en el desarrollo tecnológico, también en la creación de un mercado y la economía, pues se esperan situaciones como la reducción de costos de fabricación, inversión en tecnología y administración; así como inconvenientes con la infraestructura eléctrica y problemáticas ambientales (EC, 2014).

La competencia con otras fuentes de energía, en especial con las fuentes relacionadas a combustibles fósiles, coloca a las energías del océano en desventaja en relación con los costos, dado que se desconoce el costo real de modelos comerciales, mantenimiento y suministro de la energía.

### 2.1.1. CORRIENTES Y MAREAS

Las corrientes aprovechables en el océano pueden ser de marea u oceánicas; superficiales, profundas o costeras. Las grandes masas de agua en el planeta presentan un fenómeno en el cual ascienden y descienden debido a las fuerzas gravitacionales producidas por el sol y la luna, del cual se puede aprovechar energía potencial y energía cinética. Este fenómeno, conocido como marea, se presenta, en algunos sitios, dos veces al día o, cada 24 horas con 50 minutos y 28 segundos, generando las mareas altas y bajas. Se considera que suceden dos mareas altas y dos mareas bajas por día lunar, resultado de que en una parte de la tierra la marea suba y simultáneamente en el lado opuesto baja la marea por la influencia de la luna (Clark, 2007).

La amplitud de las mareas está regida por el ciclo lunar que tiene una duración de 29.5 días generando mareas vivas y muertas. Las mareas vivas se originan cuando el sol y la luna se alinean con la tierra, por lo que sus fuerzas de gravedad: 1) tiran en la misma dirección y 2) jalan en direcciones opuestas. El aprovechamiento de las corrientes de marea permite utilizar la energía cinética de las mareas (Rourke et al., 2010).

Las corrientes de la marea tienen movimientos muy parecidos a las corrientes del viento. Los cuerpos de agua se mueven generando corrientes que se experimentan en las costas y en lugares donde el lecho marino obliga a fluir al agua por canales. Estas corrientes ocurren en dos direcciones, cuando la dirección es hacia la costa, se le llama flujo, mientras que cuando se aleja de la costa se le llama reflujos. Ambas son aprovechables para la generación de energía eléctrica (Student Energy, 2015).

Se considera una fuente de energía con ventajas sobre otras energías renovables, dado que las mareas son predecibles, aumentando la seguridad para el suministro, además de que, como otras fuentes de energía relacionadas al océano, se considera que la generación de energía eléctrica no genera emisiones de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de forma directa. Además, dado que el agua del océano es 800 veces más densa que el aire se prevé que la energía obtenible es mayor (Cabello et al., 2017).

Las corrientes marinas presentan pocas variaciones y son controladas por la rotación de la tierra, la gravedad, los esfuerzos de viento y la diferencia de densidad de las aguas en mezcla en el océano (Yang, 2013).

No en todas las regiones del mundo se pueden aprovechar las corrientes oceánicas, pues se requieren caudales extremadamente intensos (Cabello et al., 2017). Se considera como lugares adecuados aquellos donde las corrientes tienen velocidades mayores a 2.5 m/s. Las mayores corrientes se encuentran en el océano ártico, el canal inglés, el Canal de Cozumel, el Golfo de St. Lawrence, la bahía de Fundy, el río Amazonas, etc. (Sangiuliano, 2017).

Las corrientes de marea se mueven en dos direcciones, por lo que es necesario que los equipos utilizados para su aprovechamiento puedan continuar produciendo energía cuando se presente el cambio de dirección del flujo (Student energy, 2015). En la mayoría de los casos se utilizan turbinas colocadas en las corrientes de la marea, funcionando de forma parecida a los generadores eólicos. Las turbinas extraen la energía cinética de la corriente. Estas turbinas pueden ser de eje horizontal, paralelo al flujo del agua, o de eje vertical, perpendicular al flujo como se aprecia en la Figura 1. Básicamente consisten en paletas sujetas a un buje, formando el rotor, una caja de máquinas y un generador. El flujo del agua mueve al rotor, que utiliza la velocidad generada y transformada por el generador. La energía es enviada a tierra por medio de cables (Rourke et al., 2010).

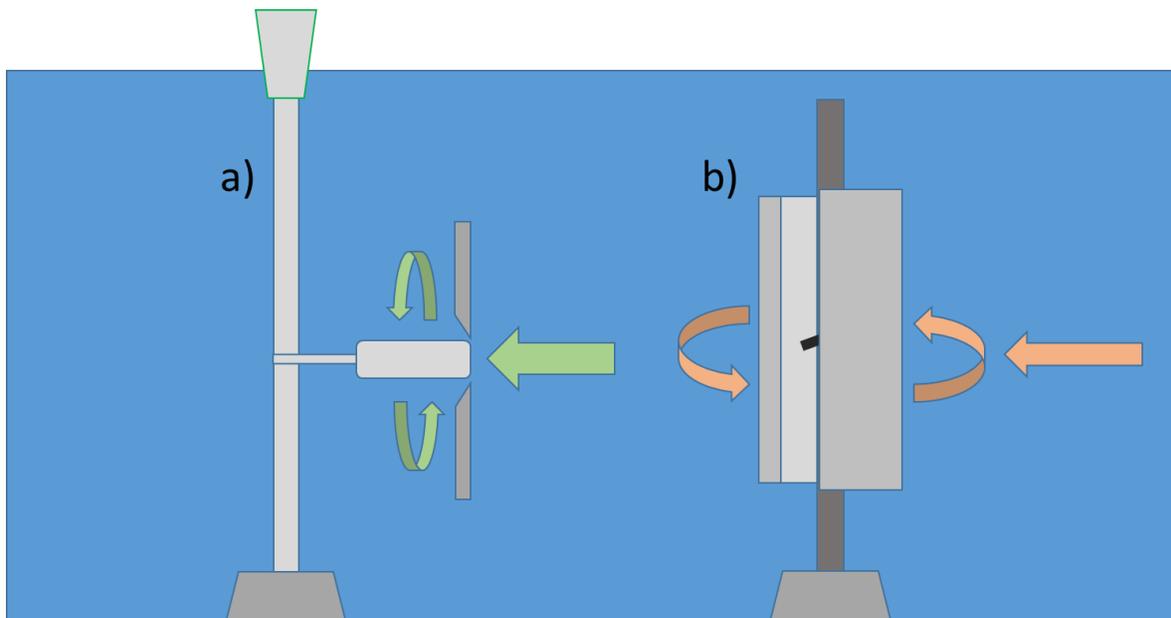


Figura 1. a) Turbina de eje horizontal, b) Turbina de eje vertical (Adaptado a partir de Student Energy, 2015).

Otra parte importante es la estructura de sujeción, y se consideran tres tipos para estas tecnologías: Estructura de gravedad, una masa de concreto y acero sujeto a la base de la estructura para conseguir estabilidad. Estructura apilada, apuntalada al lecho marino con una o más vigas de acero o concreto. Estructura flotante, estructuras sumergidas a las que está fijada el dispositivo, sujeta al lecho marino por medio de cadenas o cables.

Estas estructuras deben ser capaces de soportar la fuerza del agua, mayor que la del aire, por lo que las estructuras deben ser más resistentes que las utilizadas para la generación de energía eólica (Rourke et al., 2010). Escocia cuenta con un centro de pruebas, EMEC (European Marine Energy Centre) en Orkney, que desde mayo de 2005 se utiliza para probar turbinas de corriente marina (Norries et al., 2007).

Actualmente diversos tipos de turbinas están siendo aplicadas en diferentes partes del mundo como:

Deltastream, por Tidal Energy Ltd. en UK, con una generación de 1.2 MW, son tres turbinas de eje horizontal de tres paletas, cada turbina de 15 m de diámetro montadas en marcos triangulares (Nasir & Khan, 2012). Free Flow Turbines, por Verdant Power Ltd, con sedes en USA y Canadá, de eje horizontal con tres paletas y diámetro de 4.68 metros, un prototipo se está probando en NY, generando 1 MW hora al día (Verdant Power, 2008). En 2008 se consiguió un contrato de 1.15 millones de dólares por Sustainable Development Technology Canada para el proyecto Cornwall Ontario River Energy Garlov helical turbine de eje vertical, desarrollada por GCK Technology Inc, con base en USA, utiliza tres paletas torcidas en forma de hélice, lo que reduce las vibraciones, un modelo de 1 m se comenzó a probar en 2002 (Power Technology, 2019).

El grupo de trabajo de CeMIE OCEÁNO se encuentra realizando estudios de factibilidad de zonas para el establecimiento de tecnologías para corrientes marinas, enfocándose en lugares como Cozumel, México, además, se encuentran rediseñando un modelo de generador hidroeléctrico, primeramente, desarrollado en el proyecto IMPULSA de la UNAM, mostrado en la Figura 2 (Mariño et al., 2017).

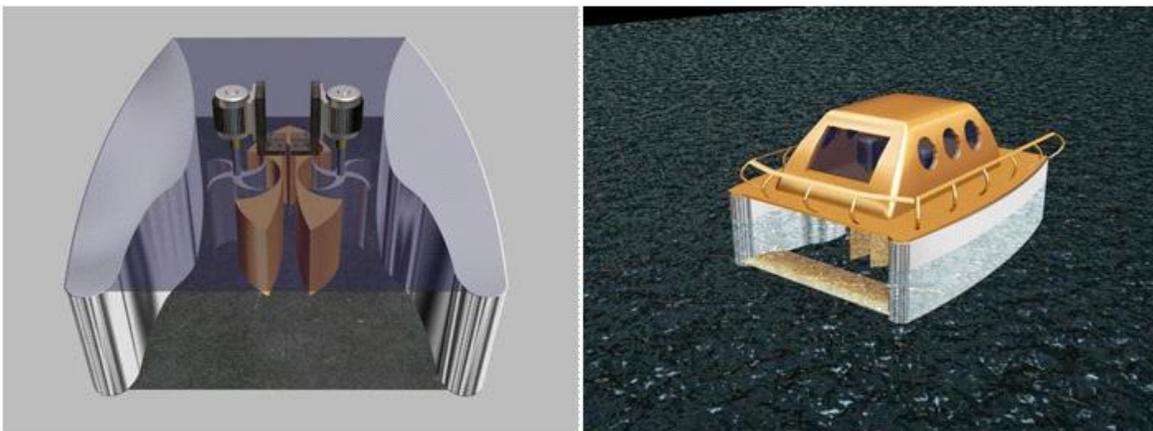


Figura 2. Hidrogenerador IMPULSA de la UNAM (Mariño et al., 2017).

### 2.1.2. GRADIENTE TÉRMICO

Las tecnologías utilizadas para aprovechar el gradiente térmico son conocidas como dispositivos de conversión de energía térmica del océano (Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC) y aprovechan el gradiente térmico que se presenta al aumentar la profundidad del océano. El gradiente térmico es producido debido a la capacidad de absorción de la energía térmica solar por parte del océano, siendo mayor la temperatura en la superficie y va disminuyendo con el aumento de la profundidad.

Los sistemas OTEC utilizan los ciclos de Rankine con variaciones que permiten usar la diferencia de temperatura del agua tibia de la superficie del océano y el agua fría de las profundidades, para que un fluido de trabajo con bajo punto de ebullición se evapore y haga girar turbinas para que se produzca energía eléctrica. Para un buen funcionamiento, se requiere que la diferencia de las temperaturas entre

las aguas superficial y profunda sea de al menos 20°C, por lo que las profundidades de extracción del agua llegan a ser de 1000 m. Encontrar esta diferencia de temperaturas es más común en las zonas ecuatoriales y subtropicales, donde se puede encontrar la diferencia de temperaturas necesarias entre la superficie y los 500 m de profundidad (Fernández, 2008) limitando los lugares del mundo donde se puede utilizar este tipo de tecnologías. Además, puede suministrar energía las 24 horas del día a tasa constante (Vega, 2012)

Una planta OTEC puede utilizar un ciclo abierto, cerrado, o mixto, y por su localización, pueden ser *on-shore* (es decir sobre tierra) y *off-shore* o flotantes.

Las plantas *on-shore* pueden ser construidas en lugares seguros, no requieren sistemas de anclaje, el cableado es de menor longitud y los subproductos, como son el agua dulce y agua fría para refrigeración son entregados de forma sencilla, pero requieren tuberías de descarga suficientemente largas para que la descarga sea en una zona alejada de la costa.

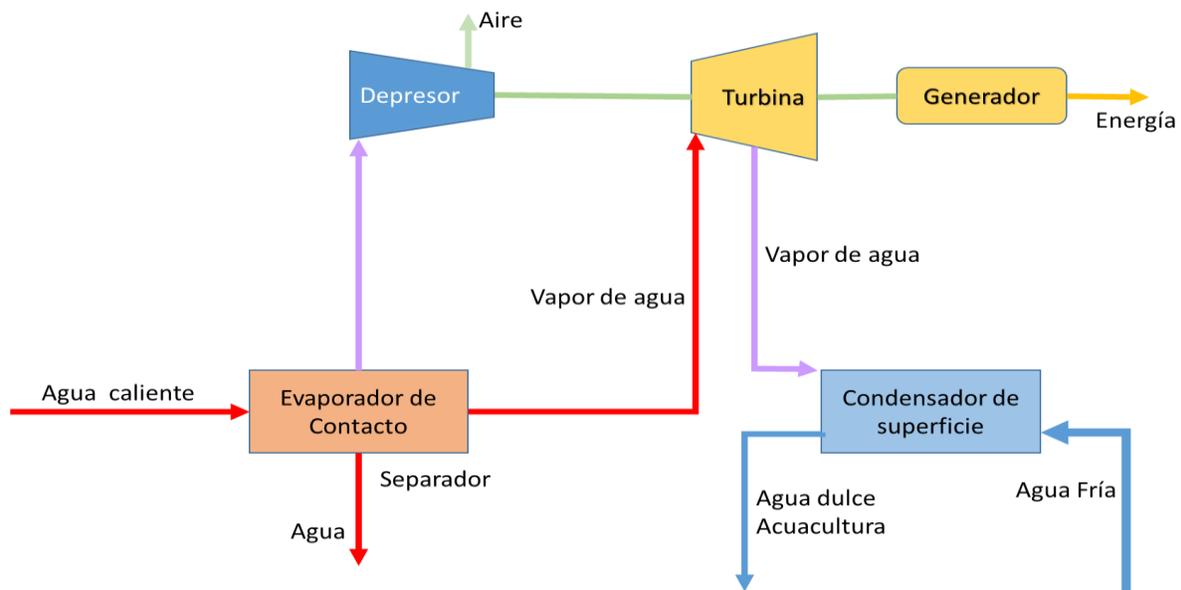


Figura 3. Sistema de energía del Ciclo Abierto (OC) de OTEC (Fernández, 2008).

Las plantas *off-shore* trabajan en mar abierto, sobre plataformas o sobre buques, pero presentan una serie de problemas en su operación, pues requieren de sistemas de anclaje a profundidades que rebasan los 1000 metros, además de que el daño por las corrientes y las tormentas es mayor. Sin embargo, la longitud de las tuberías de extracción y retorno es menor que las tuberías utilizadas en plantas *on-shore*.

Ciclo abierto (OC, por sus ciclas en inglés)

Se le conoce también como ciclo de Claude y utiliza el agua como su fluido de trabajo. El agua de la superficie es succionada por bombas de vacío para llevarla al evaporador. Este ciclo utiliza un proceso conocido como evaporación flash, en el cual se usa un sistema de aspersion para que mayor cantidad de agua tibia se evapore, al bajar súbitamente la presión, llevando al agua a su punto de ebullición y convirtiéndola en vapor (Bernal-Francisco, 2016), de este vapor, una parte se dirige hacia una turbina para moverla y producir electricidad, mientras que otra parte del vapor se dirige a un condensador que utiliza el agua de las profundidades para condensar el vapor y obtener agua líquida, que además, se ha desalinizado, por lo que el agua dulce es un producto secundario de este proceso. El agua utilizada en el evaporador y en el condensador es regresada al océano. Su rendimiento es muy bajo

en comparación al ciclo cerrado, alrededor del 7%. Se le considera el ciclo de menor impacto, debido a que el fluido de trabajo es el agua, sin embargo, requiere un consumo de energía no solo en el bombeo de agua fría, sino también en la bomba de vacío del evaporador (Figura 3).

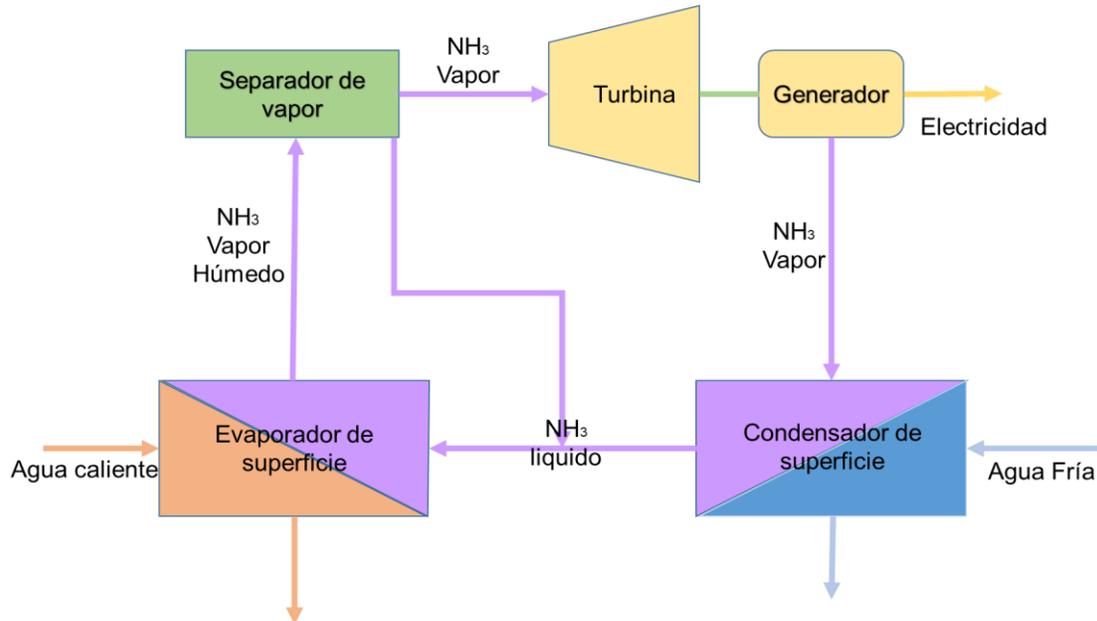


Figura 4. Sistema de ciclo cerrado (CC) de OTEC (Fernández, 2008).

Ciclo cerrado (CC).

Es conocido como ciclo Anderson, y utiliza fluidos de trabajo con bajo punto de ebullición, como el amoníaco, 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, después ingresará a otro intercambiador de calor, donde el agua de las profundidades lo condensará para recircularlo en el sistema (Figura 4). Su eficiencia es mayor que la del ciclo abierto, aunque no genera subproductos (Fernández, 2008).

Ciclo mixto

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 (Figura 5) (Fernández, 2008).

Las tecnologías OTEC han sido investigadas desde 1881 por Arsene D'Ansoval (Meegahapola, 2007), si bien han estado en fase de desarrollo desde entonces, lo cierto es que su crecimiento es lento en comparación con otras tecnologías. La mayoría de las empresas y plantas relacionadas a las tecnologías OTEC se encuentran en Estados Unidos (Hawái), Corea, China y Japón (Garduño et al., 2018).

En México los estudios de estas tecnologías comenzaron en 1960 por Alfred Löhnberg, enfocado en el Caribe Mexicano y Vázquez de la Cerda que planteó utilizar esta tecnología para obtener energía a utilizar en aire acondicionado para los habitantes de Cozumel (Garduño et al., 2018). Hasta 2007 se

retomó el interés por las tecnologías, con estudios de zonas factibles para la instalación de plantas OTEC, donde Cozumel aparece como una posibilidad, que más tarde también fue contemplada por Barcenas (2014).

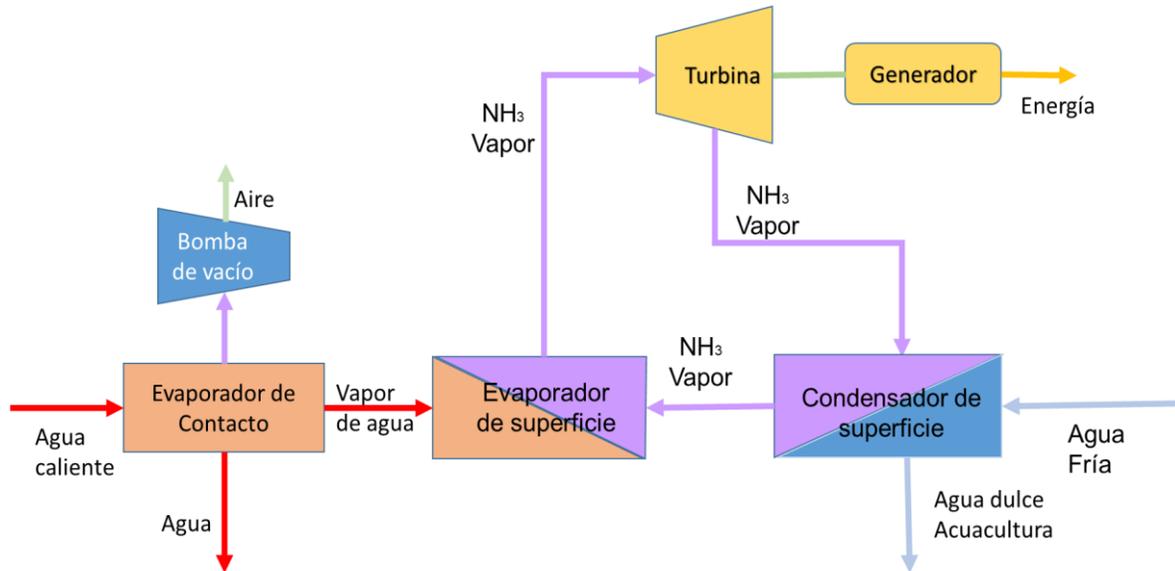


Figura 5. Funcionamiento del ciclo mixto de OTEC (Terry de Loredo, 2018).

En 2015, García señala como posible sitio de instalación Puerto Ángel en Oaxaca, y en 2016 Bernal realizó un estudio técnico y económico de una planta OTEC, mientras Garza Cueva (2016) diseñó un vaporizador para una planta de 1 kW neto.

### 2.1.3. GRADIENTE SALINO

El gradiente salino es la diferencia de la concentración salina que tienen dos puntos diferentes en el agua. A la generación de energía por gradiente salino se le llama también energía azul, y se basa en el aprovechamiento de un proceso de transporte de masas, que involucra dos cuerpos de agua de diferente concentración salina, a través de una membrana para llegar a un equilibrio de concentración.

1m<sup>3</sup> de agua de río en mezcla con una gran cantidad de agua de mar puede producir, teóricamente, alrededor de 2 MJ de energía (Pattle, 1954). En la naturaleza, la mezcla de aguas de diferentes salinidades más importante se presenta en la desembocadura de los ríos.

Actualmente hay tres grupos de tecnologías establecidas para la extracción de la energía de gradiente salino.

Osmosis de Presión Retardada (PRO). Al colocar dos cuerpos de agua de diferente concentración salina, separados por una membrana, cuando estos cuerpos se mezclan, esta mezcla tenderá 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 como se aprecia en la Figura 6. 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 (Bernal 2016).

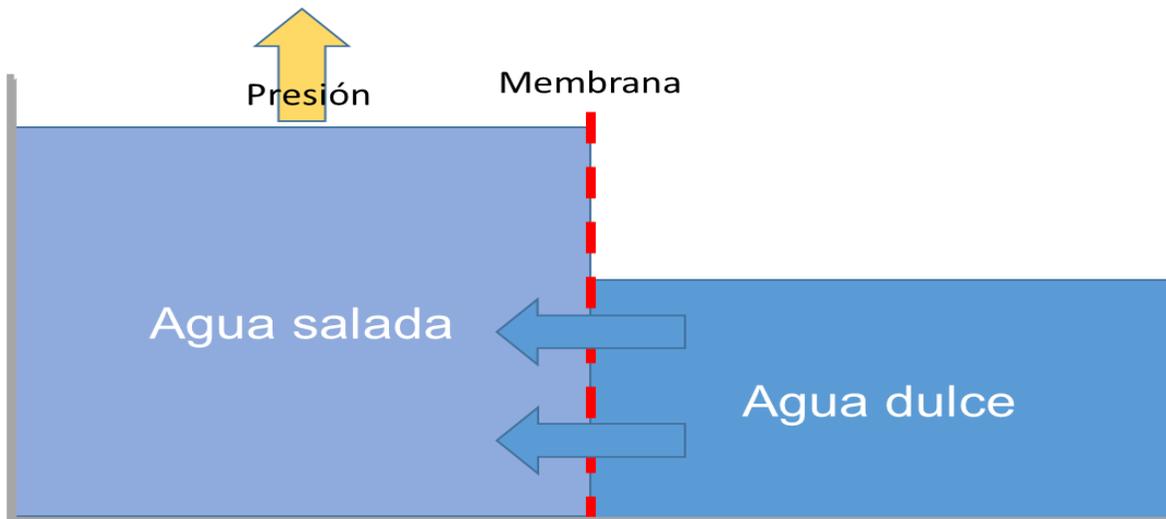


Figura 6. Sistema de presión osmótica retardada (Bernal, 2016).

Electrodiálisis Inversa (RED). 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 redóx, utilizando una sustancia como el cloruro de hierro como electrolito (Figura 7) (Bijimans et al., 2012).

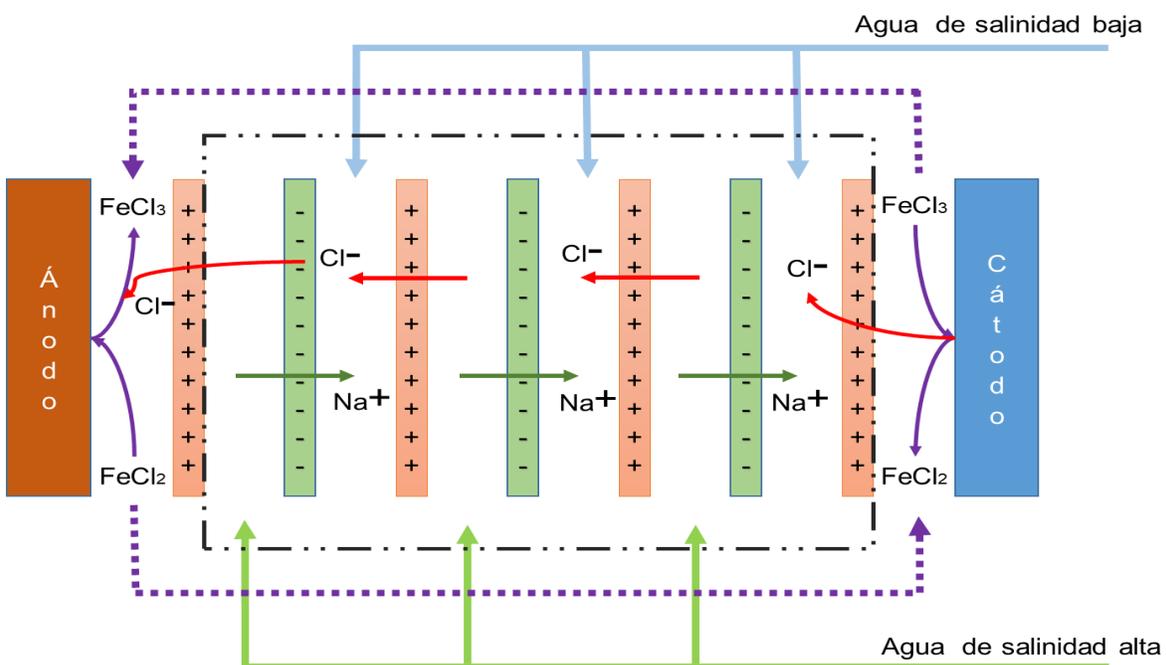


Figura 7. Sistema de electrodiálisis inversa (Bijimans et al., 2012).

Mezcla capacitiva (CapMix). Este tipo de tecnología consiste en dos súper capacitores de carbón activado. En la etapa de carga, los capacitores son sumergidos en una corriente de agua salada, mientras que, en la descarga, la corriente es de agua de río, sus densidades de generación son muy bajas (Bijimans et al., 2012).

## 2.2. EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE ENERGÍAS DEL OCÉANO

Debido a la complejidad de los proyectos, los impactos ambientales de sistemas de generación de energía del océano no se han logrado comprender cabalmente, no solo porque el medio exige un estudio complejo debido a las propiedades físicas, químicas y biológicas que interactúan en varias escalas temporales y espaciales, sino también a la gran variedad de dispositivos y las diferentes formas en la que interactúan con el medio.

Se considera que la mayoría de los dispositivos contribuirían a la modificación de hábitats y producirían afectaciones directas a las especies por la exposición a dichos dispositivos, aunque la magnitud de estos impactos es incierta dado que la información existente sobre la caracterización de dichos impactos es limitada (EC, 2014).

Un mejor acercamiento se puede dar al mejorar los sistemas de recolección de información, considerando que cada zona viable puede contar con características distintas a las presentes en regiones con tecnologías ya aplicadas (EC, 2014).

Algunos proyectos financiados por la Unión Europea, como SOWFIA, ORECCA y Mermaid han desarrollado investigación en cuanto impacto ambiental, sin embargo, no se ha logrado obtener resultados concluyentes (ORECCA, 2011).

Pelc y Fujita (2002), es de los pocos trabajos que revisa los posibles impactos ambientales asociados a tres sistemas de conversión de energía del océano y uno eólico *off shore*, mientras otros trabajos se centran en un solo sistema asociado a la conversión de energía del océano. Presenta una descripción de los sistemas, las oportunidades que cada uno tiene y los impactos ambientales que pueden producir. En la mayoría de los casos se presenta un impacto directo al modificar el sitio, cambiando los ecosistemas y afectando a la vida en las zonas, aun así, concluye que el reconocimiento de los impactos ambientales producidos por estos dispositivos puede ayudar a su mejora para que puedan ser utilizados como sustitutos de sistemas asociados a combustibles fósiles.

En la Tabla 2, se muestran diversos estudios sobre evaluación de impactos ambientales asociados a la generación de energía del océano, la mayoría son trabajos teóricos que buscan indicar cuales serían los posibles impactos ambientales asociados a diferentes sistemas de generación de energía a partir del océano. Solo unos pocos son casos de estudio asociados a un dispositivo en específico.

**Tabla 2. Trabajos publicados sobre evaluación de impactos ambientales de dispositivos de generación de energía del océano.**

Tipo	Sistema	Fuente	Observaciones
Teórico	Undimotriz	Muetze et al., 2006	Ejemplifica los posibles impactos ambientales para dos sistemas de generación undimotriz, el sistema de absorción puntual, y el sistema de columna de agua oscilante.
Teórico	Undimotriz, OTEC, Marea, Eólico off shore	Pelc y Fujita., 2002	Descripción de los posibles impactos ambientales asociados a sistemas OTEC, mareomotriz, undimotriz y eólico off shore. La mayoría de los impactos descritos se asocia a la modificación del medio en el que se instalaron los dispositivos.

Teórico	OTEC	Abbasi et al., 2000	Revisión de posibles impactos ambientales asociados a diferentes sistemas de energía renovable. Para el océano, solo revisa los sistemas OTEC.
Teórico	Undimotriz	Falnes et al., 1991	Revisión de posibles impactos ambientales asociados a sistemas undimotrices <i>on shore y off shore</i> .
Práctico	Corrientes de marea	Ahmadian, 2012	Modelación de los impactos ambientales, asociados al flujo y al transporte de sedimentos producido por la instalación de sistemas mareomotrices.
Teórico	Corrientes	Güney et al., 2010	Breve descripción de algunos impactos ambientales que deben ser mejor estudiados (ruido, cambios en el hábitat y modificación en el transporte de sedimentos).
Teórico	Undimotriz, Corrientes, OTEC, Gradiente salino	Sorensen et al., 2008	Breve descripción de algunos impactos ambientales que deben ser mejor estudiados (ruido, cambios en el hábitat y modificación en el transporte de sedimentos).
Teórico	OTEC	Moriarty et al., 2012	Revisión de posibles impactos ambientales de diversas fuentes de energía renovable. Para energías del océano, solo menciona OTEC.
Teórico	OTEC CC	Quinby-Hunt et al., 1987	Se trata a detalle los impactos ambientales y climáticos asociados a diferentes etapas de vida de un sistema OTEC CC.
Teórico	OTEC OP	Quinby-Hunt et al., 1986	Se trata a detalle los impactos ambientales y climáticos asociados a diferentes elementos de un sistema OTEC OP.
Teórico	OTEC	Allender et al., 1978	Revisión de elementos del sistema OTEC y sus posibles afectaciones ambientales, hace además revisión de herramientas para el modelado de impactos.
Práctico	OTEC	Devault et al., 2017	Descripción de la investigación sobre los impactos ambientales asociados (cambio en la temperatura, salinidad y peligros potenciales del fluido de trabajo) a un sistema OTEC en Martinica.
Teórico	Gradiente salino	Seyfried et al., 2019	Descripción de la evaluación de posibles impactos (destrucción y modificación de hábitats y comportamientos) asociados a la construcción, operación y desmantelamiento de un sistema de gradiente salino.
Teórico	Gradiente salino	Papapetrou et al., 2016	Descripción de los impactos ambientales asociados a la instalación de un sistema de gradiente salino (consumo de agua, cambio de temperatura y salinidad del agua, y descarga de contaminantes)
Práctico	Undimotriz	Viola et al., 2015	Evaluación de impactos durante la instalación, prueba y desinstalación del dispositivo. Se concluyó que un sistema WEC instalado en Sicilia.

## 2.3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

El análisis de ciclo de vida (ACV) es un método que ofrece una visión completa del panorama, permitiendo revisar los impactos ambientales generados de forma total y por proceso, desde la extracción de las materias primas, hasta el final de la vida útil y su disposición, considerando todos los vectores ambientales: aire, agua y suelo (ISO 14040, 2006).

El ACV permite comparar productos o procesos, por lo que la elección de materiales y la identificación de posibles mejoras en un sistema que permitan un desarrollo más amigable con el ambiente, se facilita, disminuyendo la incertidumbre y aumentando el atractivo de inversión.

Un ACV requiere de la recolección de información de las entradas (materia, recursos y energía); y salidas: (productos, las emisiones al agua, al aire y residuos sólidos) en cada etapa de desarrollo.

La metodología del ACV está revisada por la Organización Internacional de Estandarización, a través de la norma ISO 14040, en la que se describen cuatro etapas interrelacionadas con una secuencia definida, pero flexible, ya que los resultados de una etapa previa permiten la reformulación de las hipótesis.

### 2.3.1. ETAPAS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

- Definición de objetivos y alcances. Se debe establecer claramente y de forma consistente, el propósito, rumbo y extensión del estudio. Para llevar a cabo el ACV, es necesaria la definición de una unidad funcional que permita la comparación entre dos sistemas. Esta unidad será definida a partir de la información y datos obtenidos, deberá brindar una referencia de las entradas y salidas relacionadas. También es importante la definición de límites espaciales y temporales, además de los alcances.
- Análisis del inventario. Se recopilan datos y se cuantifican las entradas y salidas de los flujos de masa y energía relevantes para el sistema, siempre relacionados con la unidad funcional. Estas entradas incluyen materias primas, agua, combustibles y electricidad, mientras las salidas incluyen productos, emisiones y descargas asociadas al sistema durante todo el ciclo de vida del producto o servicio. Esto indica que la recolección de información detalla y de calidad es necesaria, por lo que un plan de recolección de datos puede ser útil.
- Evaluación del inventario. Se evalúan los impactos ambientales por cada proceso unitario en el sistema, se establecen las categorías de impacto en función del objetivo y del alcance del estudio.
- Interpretación de los resultados del análisis de ciclo de vida. Evaluar resultados, plantear conclusiones y realizar recomendaciones para la toma de decisiones. (ISO 14040, 2006).

El ACV es un proceso iterativo, es decir, siempre se puede dar un paso atrás para redefinir y cambiar la estructura, como se aprecia en la Figura 8.

El ACV permite tomar decisiones a largo plazo, evitando además el traslado de problemas ambientales entre etapas, zonas geográficas y medios, logrando el desarrollo de productos y servicios de una forma sustentable.



Figura 8. Etapas del ACV (ISO 14040, 2006).

## 2.4. ACV DE ENERGÍAS DEL OCÉANO

Ya se han realizado trabajos sobre ACV de energías del océano, sin embargo, la mayoría se centra en la evaluación de dispositivos WEC, y tienden a priorizar la categoría de impacto de Cambio Climático, realizando un análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a los dispositivos, además de revisar la cantidad de energía utilizada para la producción de los mismos.

Algunos autores como Aalbers (2015), Uihlein (2016) y Zhai (2019) consideran otras categorías de impacto, además de cambio climático. En el caso de Aalbers solo considera los valores, mientras que Uihlein y Zhai, los presentan en forma porcentual, dificultando la comparación de los resultados.

Por su parte, Douziech et al. (2016), evalúa tres sistemas de marea y uno undimotriz. Los resultados del sistema undimotriz en la categoría de cambio climático son un 60 % mayores que los valores de un sistema eólico, pero los sistemas de marea presentan valores semejantes y menores al sistema eólico. Al igual que Uihlein (2016), reporta que el uso de sistemas de conversión de energía del océano para producir electricidad, tienen asociado un valor de impacto en la categoría de cambio climático hasta 115 veces menor que electricidad producida por plantas que utilizan carbón. Aún así, Douziech (2016) reporta que los sistemas de energías renovables (undimotriz, solar, eólico) presentan un mayor impacto en la categoría de agotamiento de recursos minerales que los sistemas de generación eléctrica que utilizan combustibles fósiles.

**Tabla 3. Trabajos publicados sobre ACV de energías del océano.**

Fuente	Dispositivo	Observaciones
Hans et al., 2007	WEC	ACV para un WEC, considera 15 categorías de impacto, sin comparación con otros sistemas de generación de energía.
Parker et al., 2007	WEC	Evalúa energía y CO <sub>2</sub> asociado a un sistema WEC y lo compara con otros sistemas de generación de energía (ninguno del océano),
Douglas et al., 2008	SeaGen	Evalúa la energía usada y la huella de carbono para el generador SeaGen.
Rule et al., 2009	Corriente de marea	Comparación de CO <sub>2</sub> asociado a 4 sistemas de generación eléctrica, donde el sistema mareomotriz es el que presenta el menor impacto asociado a la generación de 1 kWh.
Raventos et al., 2010	Corrientes de marea y WEC	El proyecto EQUIMAR propuso la implementación de protocolos para la evaluación de distintos aspectos (generación, viabilidad, impacto ambiental, etc.) para dispositivos de corrientes de marea y undimotrices. Propone, además, un borrador de protocolo para la aplicación de ACV, tomando como referencia la información y los procesos utilizados por Parker et al., 2007 y Hans et al., 2007.
Banerjee et al., 2013	WEC, Mareomotriz, OTEC	Comparación de CO <sub>2</sub> asociado a 4 sistemas de energía del océano, respecto a otros sistemas de generación.
Aalbers 2015	OTEC CC 10 MW	ACV para un sistema OTEC CC de 10 MW. A pesar de presentar valores para otras categorías de impacto, solo se discute la categoría de cambio climático.
Walker et al., 2015	TGL, Openhydro, Flumill, Scotrenewable	Energía y CO <sub>2</sub> asociado a 4 dispositivos de energía del océano.
Uihlein, 2016	WEC, marea	Evalúa los impactos asociados a alrededor de 15 dispositivos de energía del océano. Presenta resultados generales para dos dispositivos, resultados de CO <sub>2</sub> y energía asociada a todos los dispositivos y comparación de 4 categorías de impacto con otros artículos.
Douziech et al., 2016.	WEC, corrientes de marea	Discute y compara los resultados de las categorías de cambio climático, toxicidad humana y marina, agotamiento de recursos minerales y formación de materia particulada y energía asociados a 5 dispositivos de conversión de energía del océano con otros dispositivos del océano. Presenta información suplementaria con los resultados sin discutir de 18 categorías de impacto.
Zhai et al., 2018	WEC	ACV para un dispositivo WEC, presenta los resultados para 18 categorías de forma porcentual y discute el CO <sub>2</sub> y la energía asociada al dispositivo.
Thomson et al., 2019	WEC	ACV para un sistema WEC, considerando 18 categorías y la energía asociada al dispositivo.

En la Tabla 3 se presentan algunos de los trabajos asociados a la evaluación de impactos de dispositivos de generación del océano utilizando la metodología de ACV.

Según Uihlein (2016), los impactos están asociados principalmente al anclaje y a las estructuras de sujeción, siendo despreciables el ensamblado, la instalación y el uso. Los sistemas que presenta son sistemas que aprovechan las corrientes para la conversión de energía, siendo elementos que aprovechan un fenómeno físico del océano y que requieren casi nula entrada de insumos durante su operación. También señala que los valores de impacto de su dispositivo son similares a los asociados

a turbinas eólicas, y representan una buena oportunidad para producir energía con una reducción de impactos ambientales, especialmente en lo que a cambio climático se refiere.

Al comparar un sistema de mareas con otras formas de generación de energía que utilizan fuentes renovables (eólico, geotérmico, hidroeléctrico). Rule et al. (2009) reportan que el sistema de mareas es el que presenta menor impacto en la categoría de cambio climático, demostrando que las energías asociadas al océano son una buena respuesta a la búsqueda de tecnologías con baja emisión de gases de efecto invernadero.

Walker et al. (2013) reportan que los materiales tienen asociado el mayor impacto relacionado a cambio climático. Al comparar los sistemas estudiados con otros sistemas de generación de energía, se observa que sus sistemas presentan valores mayores a la energía eólica, pero son comparables a sistemas hidroeléctricos, solares y de biogás, además de presentar menor impacto que los sistemas asociados a combustibles fósiles.

El sistema WEC analizado por Thomson et al. (2019) presenta valores en el mismo rango que otros sistemas renovables para seis categorías de impacto, entre ellas cambio climático, aunque tiene un peor desempeño que otros sistemas renovables en 8 categorías. Aun así, su impacto es menor a sistemas que utilizan carbón, exceptuando en la categoría de agotamiento de recursos minerales.

Todos los trabajos revisados de ACV del océano reportan resultados en la categoría de cambio climático, mostrando que los sistemas asociados a la energía del océano tienen valores comparables con otros sistemas de energías renovables y menores que sistemas asociados a combustibles fósiles, por lo que pueden posicionarse como una alternativa para la transición a energías más limpias. Aun así, pocos evalúan otras categorías de impacto, donde otras fuentes renovables, como los sistemas eólicos, tienen mejor desempeño. Los trabajos de Thomson et al. (2019) y Douziech et al. (2016) muestran que en algunas categorías (concretamente agotamiento de recursos minerales) las energías renovables presentan valores más altos que los sistemas asociados a combustibles fósiles. Por esto, es importante establecer las categorías de impacto que sean representativas de los sistemas para poder encontrar las oportunidades de mejora en las tecnologías de generación a partir del océano.

## 2.5. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Con la publicación de la Ley de Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento a la Transición de Energía del 2008 (LAERFTE), se comenzó a invertir en el desarrollo de conocimiento y tecnología para la generación de energía. Esta Ley se derogó, sin embargo, sus compromisos siguen vigentes en la Ley de Transición Energética del 2015 (LTE) y su Programa Especial de la Transición Energética 2017-2018 (PETE) (SENER, 2017). Estas metas incluyen, a corto plazo, una generación de 25% por parte de energías renovables para el 2018, y a mediano y largo plazo, una generación del 35% para 2024 y del 50% para 2050, respectivamente (SENER, 2018).

Para cumplir con dichos compromisos, la Secretaría de Energía (SENER) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), han colaborado para desarrollar los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIEs). En estos grupos de trabajo, se congregan instituciones públicas y privadas, instituciones educativas, empresas y entidades gubernamentales, con el propósito de desarrollar tecnologías, productos y servicios relacionados a la generación y el aprovechamiento de las energías renovables (Güereca, 2014).

Actualmente existen cinco CEMIEs en operación, enfocándose cada uno en una fuente de energía renovable: biocombustibles, energía eólica, energía geotérmica, energía solar y energía oceánica (INEEL, 2016).

El CEMIE Océano, busca posicionar a México como un referente en cuanto a la generación de conocimientos y talentos para el aprovechamiento del océano como una fuente de energía (Güereca, 2014).

CEMIE Océano, tiene como visión “Reunir las capacidades de la academia e industria para: el impulso del desarrollo económico nacional basado en energías limpias, la reducción de la dependencia energética de combustibles fósiles, la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero y el fomento de un crecimiento sustentable que garantice la seguridad energética” (CEMIE Océano, 2018).

Su objetivo es encargarse del desarrollo, promoción y aprovechamiento de sinergias mediante alianzas estratégicas multidisciplinarias participativas y dinámicas para el aprovechamiento sustentable de energía y abatir las barreras y retos científicos-tecnológicos del país (CEMIE Océano, 2018).

México cuenta con 11,122 km de litoral continental que permiten la explotación de casi todo recurso energético del océano. Por ejemplo, se considera un contenido energético de 20 a 30 kW/m en las olas. Además, por su ubicación cercana al ecuador, en lugares como el caribe mexicano se estudian las condiciones para la explotación de los gradientes térmico y salino (Bruciaga et. al, 2016).

La mayoría de las tecnologías para el aprovechamiento de la energía del océano se encuentran en etapas tempranas, existiendo solo unos ejemplos de dispositivos que ya se estén utilizando como sistema energético, como el sistema OTEC en Hawai, (Garduño et al., 2018) y embalses de marea como la Rance en Francia (Rourke et al., 2010), lo que permite visibilizando desventajas al comparar con sistemas convencionales de generación de energía. Un ejemplo es el factor económico, dado que no existe un mercado de energías del océano, el costo para el desarrollo de la tecnología necesaria y su implementación es elevado.

El desarrollo tecnológico en sí mismo presenta un problema, debido a la gran variedad de dispositivos y procesos que se están estudiando de manera simultánea, por lo que la selección de un sistema para la inversión y futura comercialización es aún complicada.

Otro de los inconvenientes es la escasa información que se tiene sobre el impacto ambiental asociado a estos sistemas, por lo que es difícil saber en qué medida son realmente una opción de menor impacto para el ambiente (EC, 2014).

La transición del uso de fuentes de energía renovables requiere de una evaluación de impacto ambiental que permita minimizar los posibles efectos negativos en el ambiente. En este sentido, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta metodológica que permite evaluar los impactos ambientales de productos o servicios de una forma holística, ya que considera todas las etapas del ciclo de vida, así como todos los vectores involucrados: aire, agua y suelo (ISO 14040, 2006) siendo sus principales objetivos la reducción del uso de recursos y de las emisiones al ambiente.

## 2.6. OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es evaluar los impactos ambientales de sistemas tecnológicos de generación de energía a partir del océano mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con la finalidad de identificar los procesos con mayores impactos ambientales. Los sistemas por evaluar son: gradiente térmico, gradiente salino, corrientes marinas y de marea.

## 2.6.1.OBJETIVOS PARTICULARES

- Definiciones detalladas con enfoque de ciclo de vida de 4 sistemas de generación de energía del océano: OTEC CC (Conversión de Energía Térmica Oceánica utilizando Ciclo Cerrado, por sus siglas en inglés), Gradiente salino RED (Electrodiálisis Inversa, por sus siglas en inglés), corrientes de marea (SeaGen) y corrientes marinas (Hidrogenerador IMPULSA).
- Elaborar inventarios de entradas y salidas para cada una de las etapas de ciclo de vida de los cuatro sistemas a analizar.
- Evaluar impactos ambientales mediante la metodología de ACV.
- Identificar mejoras ambientales en las etapas de ciclo de vida de los dispositivos evaluados.

## 3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para la evaluación de impactos ambientales mediante Análisis de Ciclo de Vida, se presenta en la Figura 9.



Figura 9. Pasos a seguir durante la metodología.

### 3.1. FUNCIÓN DEL SISTEMA Y UNIDAD FUNCIONAL

Las tecnologías por analizar son sistemas de generación de energía eléctrica, por lo que la unidad funcional utilizada en este trabajo fue 1 kWh promedio producido durante el tiempo de vida de los sistemas, al igual que se ha realizado en otros trabajos de ACV sobre sistemas de generación de energía (Douziech et al., 2016; Uihlein, 2016; Rule et al., 2009). Cada uno de los dispositivos presenta un tiempo de vida diferente, el cual es especificado en su inventario, sin embargo, se tomó

como referencia un periodo de 30 años, debido a que es el tiempo presentado para los sistemas de gradiente salino y OTEC.

### 3.2. LÍMITES DEL SISTEMA

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

En este caso la evaluación de los sistemas se integra con las etapas de vida de los dispositivos de generación, tomando en cuenta la etapa de construcción, considerando los impactos asociados a los materiales utilizados, generación y el fin de vida de los sistemas, como se aprecia en la Figura 10. Los insumos presentados en el diagrama son un ejemplo de las posibles entradas al sistema.

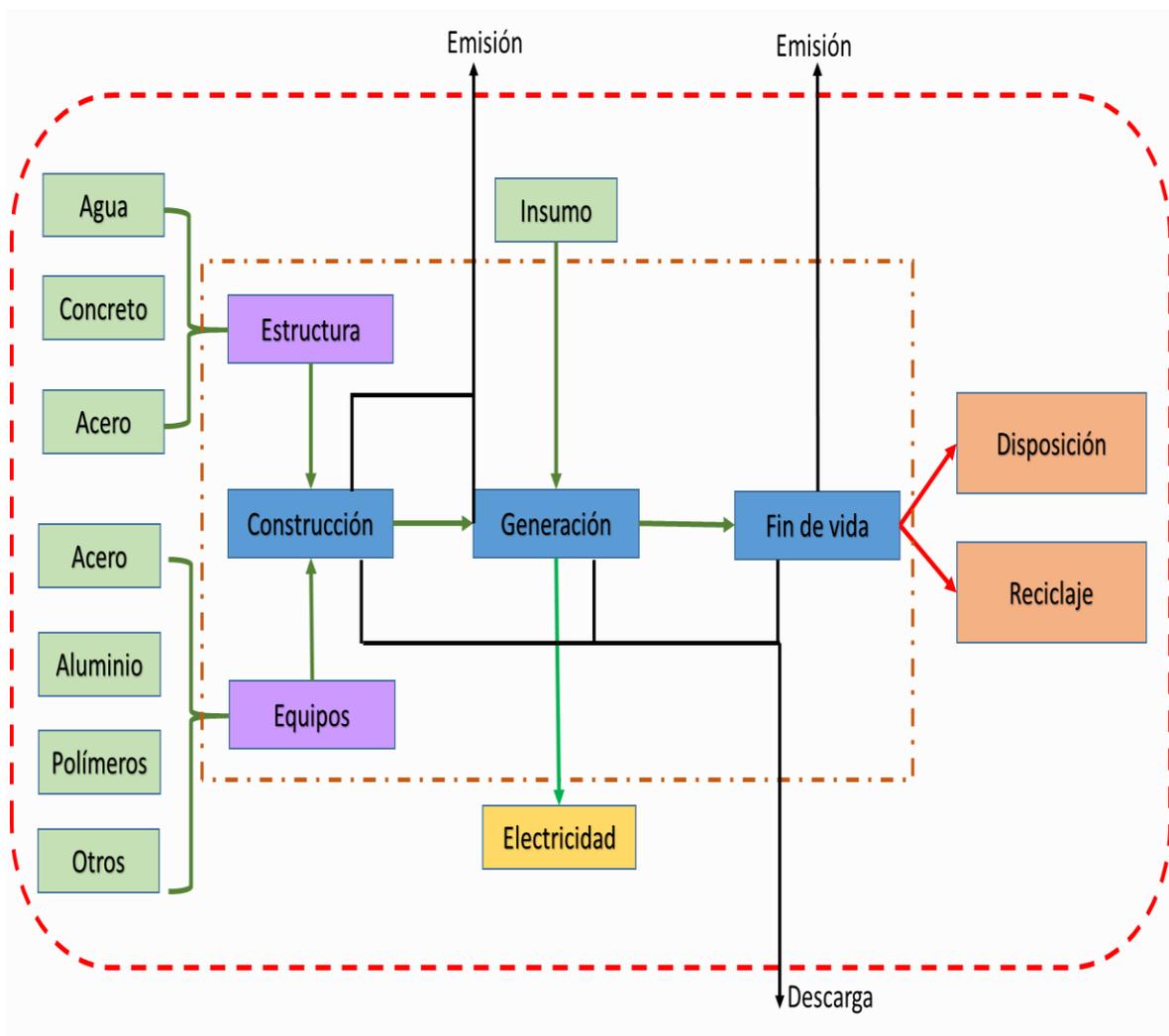


Figura 10. Límites del sistema considerados para los dispositivos de generación de energía.

#### 3.2.1. ETAPAS CONSIDERADAS EN LA MODELACIÓN DE LOS SISTEMAS

## Etapa de construcción

La etapa de construcción está considerada para todos los dispositivos. Se describió el sistema como se presenta en la Figura 11, es decir, para la etapa de construcción se integró el dispositivo a analizar en cada caso, este se fragmentó en los elementos más relevantes que lo conforman para después realizar un desglose de los materiales que forman al elemento.

Los impactos asociados a los materiales utilizados están integrados en esta etapa. La ausencia de información fue la razón por la que no se consideraran los procesos atribuidos a la fabricación final de los dispositivos. Para este trabajo no se consideró información de recubrimientos especiales para evitar la incrustación de sales.

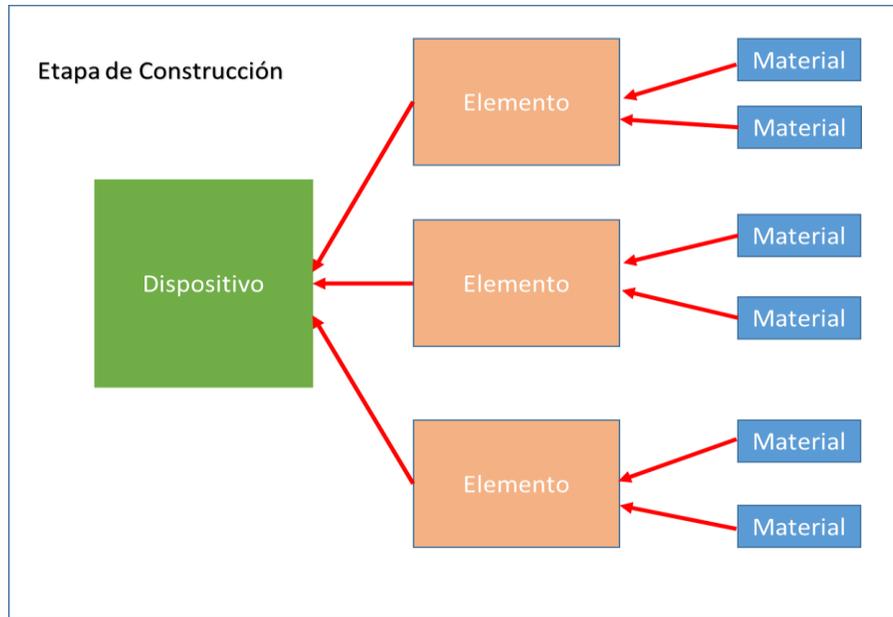


Figura 11. Estructura de la etapa de construcción para la modelación de los dispositivos analizados.

## Etapa de Generación

Esta etapa solo fue considerada para el dispositivo OTEC CC, pues es el único dispositivo con información disponible para realizar los cálculos respecto a los insumos consumidos durante la generación de electricidad. En los dispositivos de corrientes marinas, marea y gradiente salino RED, los insumos que se requieren están asociados al mantenimiento y no fueron considerados en este trabajo, debido a la falta de información de dispositivos reales.

## Etapa de Fin de vida

La etapa de fin de vida para todos los dispositivos propone escenarios de reciclaje de los materiales que así lo permitan. Los procesos se eligieron de acuerdo con el tipo de material utilizado, empleando el mismo proceso de reciclaje para materiales similares. Los procesos de disposición utilizados se muestran en la Tabla 4.

Los elementos utilizados en la etapa de fin de vida son módulos que ya están presentes en la base de datos Ecoinvent 3.4, por lo que su requerimiento de insumos es más específico que la que se pudo realizar, debido a la información disponible, para la construcción de los elementos. Esto se verá reflejado en los resultados.

**Tabla 4. Procesos de disposición final utilizados para los diferentes materiales utilizados en la modelación de los sistemas**

Material	Proceso de disposición
Acero	Reciclaje en la fabricación de barras de acero
Cobre	Reciclaje en el refinamiento de cobre
Concreto	Disposición en relleno sanitario
Aluminio	Reciclaje en la producción de barras de aluminio
Nilón	Disposición en relleno sanitario
Espuma sintética	Reciclaje en producción de espuma sintética
FRP	Reciclaje en producción de plásticos reforzados con fibras
Materiales plásticos	Disposición en relleno sanitario
Amoniaco	Reúso de amoniaco
Epoxi	Reciclaje en producción de epoxi

### 3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS

#### 3.3.1. OTEC CC (CICLO CERRADO)

La tecnología OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion, por sus siglas en inglés) utiliza la diferencia de temperaturas en el agua de mar de acuerdo con su profundidad para la generación de energía.

Actualmente CEMIE-Océano trabaja en la elaboración de un piloto OTEC de ciclo cerrado, a cargo del Dr. Miguel Ángel Alatorre, con el objetivo de producir 1 kW, empleando como fluido de trabajo el refrigerante R152a (1-1 difluoroetano). Este sistema piloto aún se encuentra en pruebas para ser evaluado en un ambiente simulado representativo. Debido a esto, un escalamiento a partir de los datos de este proyecto no es recomendada, por lo que se optó por la simulación de un sistema a partir de datos de la literatura manteniendo el ciclo cerrado propuesto por CEMIE-Océano, pero considerando amoniaco como fluido de trabajo, pues este es utilizado en plantas comerciales como la de Hawái (Power technology, 2019).

La principal fuente utilizada fue el diseño de una planta de ciclo cerrado *off-shore* (fuera de costa) fijado en un sistema de barcaza de concreto (George et al., 1979). Este trabajo analiza la construcción por módulos de plantas de diferentes capacidades. Estos módulos permiten la generación de 10 MW, empleando escalamiento horizontal, describe como se construirían sistemas para 20 MW, 50 MW y 100 MW. Los elementos principales seleccionados de este sistema fueron, la estructura flotante, de la cual se tomaron las dimensiones como constantes para las áreas de flotabilidad y tubería, mientras se modificó el tamaño de las áreas de generación proporcionalmente al número de intercambiadores de calor; se consideran también los de sistemas de bombeo e intercambiadores de calor, que cuentan con una capacidad de 2.5 MW, fabricados de aluminio y cuyas dimensiones se especifican en la

Figura 12. Otro elemento importante seleccionado de esta fuente es el volumen de amoniaco utilizado por módulo de generación (George et al., 1979).

Se utilizó también información de Vega (2010; 2012), para la actualización de materiales utilizados en las tuberías de extracción de agua de mar. Se consideraron tres tipos de tubería de acuerdo con su función y profundidad. La más relevante es la tubería de aguas profundas, que debe alcanzar los 100 m de longitud, después se tienen dos tuberías de extracción de agua superficial de 20 m de longitud, dos tuberías de salida para la mezcla de agua que deben medir 60 m y eficiencias de los equipos.

Con esta información, se estructuró un sistema OTEC de ciclo cerrado *off shore*, con una generación neta de 50 MW, como se recomendó por el grupo de trabajo de CEMIE-Océano, y una generación bruta de 80 MW, necesaria de acuerdo con Dessne (2015) y Vega (2010), con intercambiadores de calor de aluminio, que utiliza amoniaco como fluido de trabajo; y tuberías de extracción de agua de mar y de descarga de agua de mezcla hechas de FRP (polímeros reforzados con fibras, por sus siglas en inglés) y espumas sintéticas.

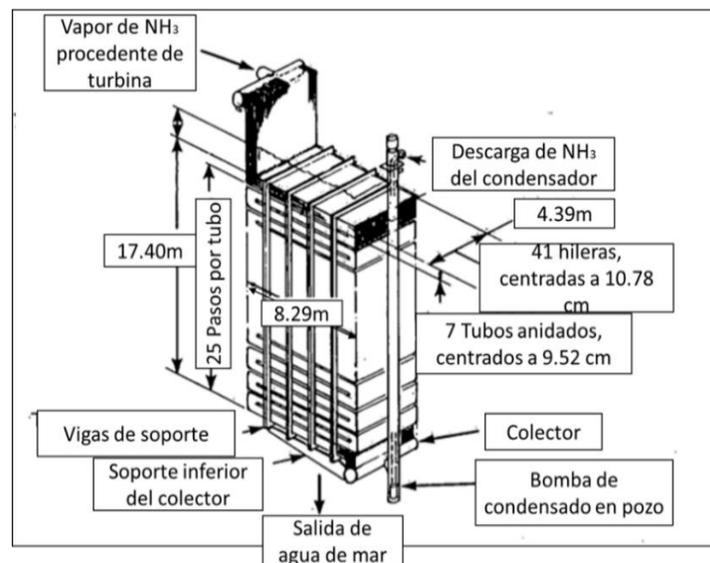


Figura 12. Estructura del intercambiador de calor propuesto por George et al. (1979).

### 3.3.2. GRADIENTE SALINO

CEMIE-Océano trabaja en la producción de pilotos de diferentes características para la generación de energía eléctrica utilizando la electrodiálisis inversa (RED, por sus siglas en inglés). Estos proyectos se encuentran finalizando la etapa de desarrollo conceptual, por lo que, al igual que el sistema OTEC, se propuso el dimensionamiento de un dispositivo tipo utilizando las partes más importantes del sistema y tomando como referencia información de literatura.

Primeramente, se definió con ayuda del grupo de trabajo de CeMIE-Océano, a cargo de la Dra. Cecilia Enriquez de la Facultad de Ciencias-Sisal, UNAM, la capacidad de generación del dispositivo tipo de 50 kW netos y 62.5 kW brutos, debido a la pérdida del 10% en el bombeo y la conversión de corriente directa a corriente alterna (CD/CA) (Post et al., 2010) y otro 10% en el pretratamiento (Vermaas et al., 2011). Posteriormente, considerando una densidad de poder de 0.7 W/m para membranas cuadradas de 10 cm de lado, como valor probable de densidad de generación ante una perspectiva de disponibilidad de materiales de mediana calidad (Veerman et al., 2010; Vermaas et

al., 2011). A partir de la generación y de la densidad de poder, se concluyó que se requería 89,285.7 m<sup>2</sup> de membrana y 8,928,571 membranas de 10 cm de lado.

Las pilas, como se muestra en la Figura 13, utilizan dos tapas con electrodos, una a cada extremo de la pila, seguidas por dos empaques. Posteriormente, se colocan las celdas, que son repeticiones de la intercalación de Membranas de Intercambio de Cationes (MIC) empaques con espaciadores, y Membranas de Intercambio de Aniones (MIA). Entre la última celda y el último empaque se coloca una membrana de intercambio de cationes extra.

Los grupos de trabajo de CeMIE Océano, a cargo de la Dra. Cecilia Enríques (Facultad de Ciencias-Sisal de la UNAM), el Dr. Edgar Mendoza (Instituto de Ingeniería de la UNAM) y la Dra. Rosa de Guadalupe González (Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, IPN), brindaron información para la selección de materiales y cantidades, referente a las tapas de las pilas y empaques. Mientras que de Veerman et al. (2010) se obtuvieron los materiales de los espaciadores y los electrodos de titanio. Veerman et al. (2009) presenta un listado de diferentes marcas de membranas utilizadas, de las cuales, se seleccionó la membrana Selemion de Asahi Glass Co, LTD. para ser introducida en el modelo, al ser la que presenta información sobre los materiales de los cuales está hecha la membrana, exceptuando un componente de patente no especificado.

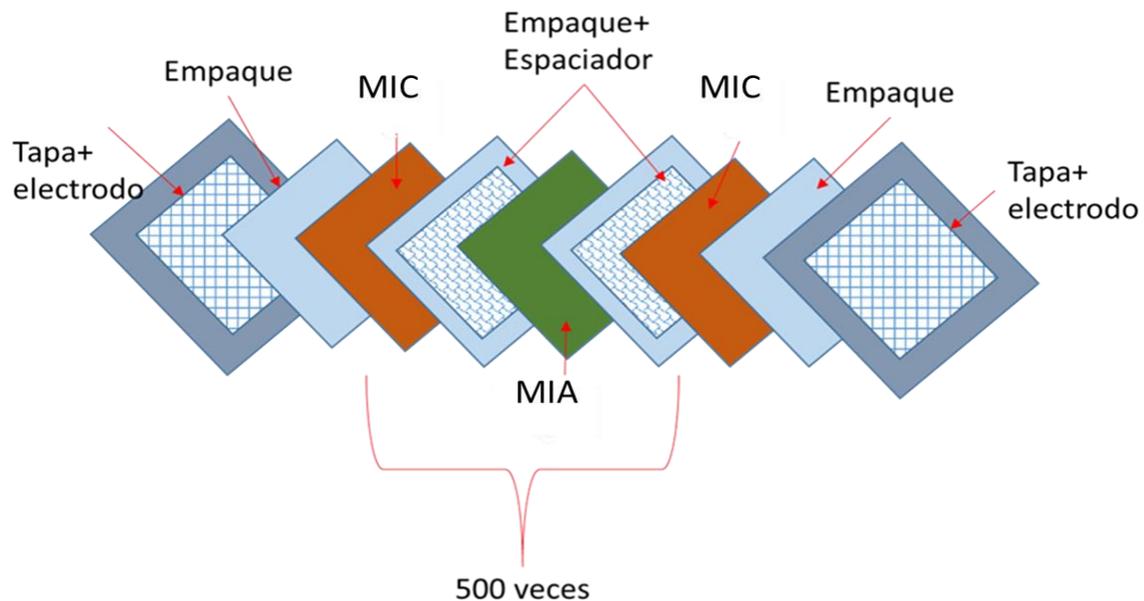


Figura 13. Estructura de la Pila utilizada para el ACV del dispositivo de gradiente salino (Veerman et al., 2010).

Se supuso la conformación de 500 celdas por pila, y un marco parecido al que propone Post et al. (2010), en el que se tienen 6 pilas, obteniendo 154 marcos para la generación necesaria. Del mismo autor, se obtuvo la información para las bombas y los filtros del pretratamiento.

### 3.3.3. CORRIENTES DE MAREA Y MARINAS

Se trabajó con dos modelos diferentes para el aprovechamiento de las corrientes. El primero, es el generador SeaGen, el primer generador de corrientes de marea a gran escala. Se utilizó la información presentada por Douglas et al. (2008), donde se presenta un desglose del porcentaje de materiales y

utilizando el peso total del dispositivo y sus componentes, se obtuvieron las cantidades de material para cada elemento del sistema. Seagen, como se observa en la Figura 15, cuenta con rotores axiales gemelos de 16 m de diámetro y es un sistema fijo al lecho marino, por lo que cuenta con una torre de apoyo para los equipos. Tiene un potencial de generación de 1.2 MWh y una potencia anual de producción de energía de 5,038 MWh.

El segundo dispositivo analizado, es un generador de corrientes marinas, perteneciente al proyecto IMPULSA de la UNAM. Actualmente forma parte de los dispositivos estudiados por CeMIE-Océano y cuya información se obtuvo del trabajo de López (2011) y del grupo CeMIE-Océano. Este dispositivo como se observa en la Figura 16, es un sistema flotante de turbinas verticales y flujo conducido. Consta de una carcasa, donde se encuentran los rotores, un par de flotadores, que son los encargados de concentrar el flujo.

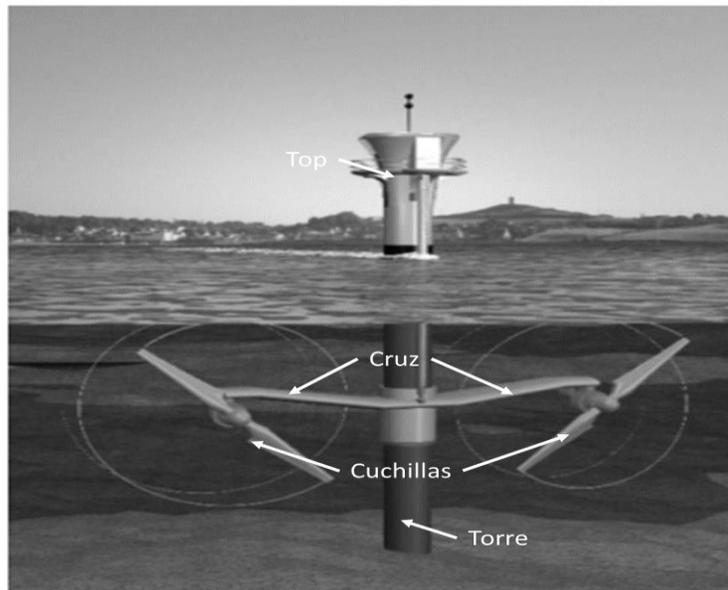


Figura 14. Generador SeaGen (Douglas et al., 2008).

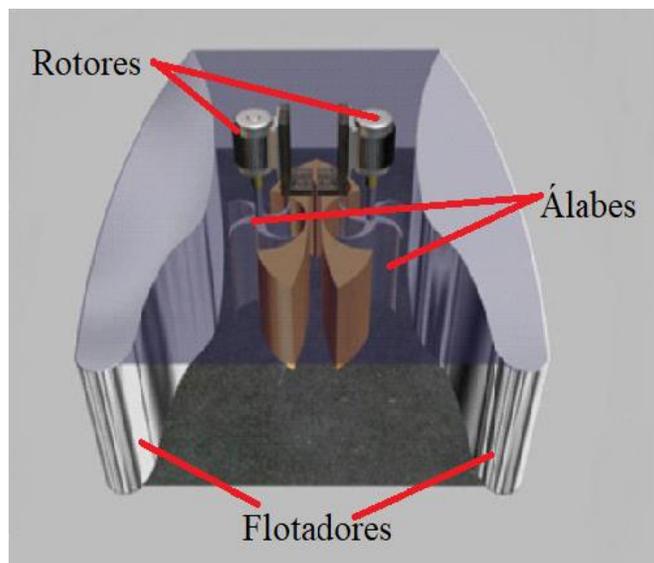


Figura 15. Estructura del Hidrogenerador IMPULSA (López, 2011).

### 3.4. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS

La modelación de los impactos ambientales se realizó con la ayuda del software GaBi, y la base de datos Ecoinvent 3.4, una de las más completas con información de diversos procesos de diferentes ámbitos a nivel mundial.

ReCiPe v1.08 es la metodología con la cual las entradas de materiales y recursos, y las salidas de emisiones y productos, serán traducidas a indicadores de categorías de impacto.

ReCiPe fue desarrollada por el RIVM (el Instituto Nacional para la Salud Pública y el Ambiente de los Países Bajos), CML, la consultoría PRé y la Universidad Radboud de Nimega; dentro de este grupo de expertos se encuentran los desarrolladores de las metodologías CML, 2001 y Ecoindicator 99. De esta forma, la metodología ReCiPe logra conjuntar elementos importantes de ambas metodologías, permite realizar modelaciones a punto medio, con 18 categorías de impacto y a punto final, con tres categorías de impacto, de acuerdo con las necesidades del estudio (Goedkoop, 2009).

Para la conversión de los impactos, ReCiPe introduce factores de incertidumbre bajo tres perspectivas culturales:

- Individualista (I). Una perspectiva optimista de corto plazo (20 años)
- Jerárquica (H). Basada en los principios de modelos científicos frecuentemente encontrados, con una perspectiva de tiempo a 100 años.
- Igualitaria (E). De largo plazo (500 años) y con principios de pensamiento precautorio.

La perspectiva seleccionada para este proyecto es la jerárquica, pues es la utilizada con mayor frecuencia para la evaluación de estos tipos de sistemas (PRé, 2012).

### 3.5. SELECCIÓN DE CATEGORÍAS DE IMPACTO

Para este trabajo se propuso el uso de las categorías utilizadas a punto medio, de acuerdo con Antón Vallejo (2004) “se hallan más cercanas a la intervención ambiental, permitiendo generar modelos de cálculo que se ajusten mejor a esa intervención”. Las categorías a punto medio utilizadas por la metodología ReCiPe son las mostradas en la Tabla 5.

Aunque se pueden considerar dentro del ACV todas las categorías, la naturaleza de los productos o servicios puede exigir mayor relevancia en unas que en otras.

La elección de categorías de impacto que sean representativas para los sistemas de generación de energías del océano aún no se ha establecido. El volumen 1 de la Guía Global para Indicadores de Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida (Frischknecht, 2016), apoya la selección de las categorías más relevantes, la cual se utiliza como una referencia.

Primeramente, sugiere la elección de indicadores centrándose en impactos de cambio climático, impactos a la salud relacionados a materia particulada fina, el uso de agua y el uso de suelo. Después se eligen indicadores para temas transversales y huellas basadas en ACV. Para la selección de los indicadores se recomienda tener en cuenta las capacidades y restricciones de los inventarios de ciclo de vida, la naturaleza de la actividad y características de la localización (Frischknecht et al., 2016).

La Tabla 6 muestra una recopilación de las categorías de impacto utilizadas en otros proyectos de ACV de energías del océano, consideradas como referencia para la selección de las categorías.

**Tabla 5. Categorías de impacto a punto medio utilizadas en 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 (14DCB al aire urbano)	Emisión de sustancias consideradas tóxicas 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 (14 DCB al suelo)	Emisión de sustancias consideradas tóxicas para la especie humana, considera como medio a los suelos industriales.
ETA	Ecotoxicidad acuática	kg (14 DCB al agua)	Emisión de sustancias consideradas tóxicas para la especie humana, considera como medio a los cuerpos de agua continentales.
ETM	Ecotoxicidad marina	kg (14 DCB al agua marina)	Emisión de sustancias consideradas tóxicas 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> x año (Tierra agrícola)	Terrenos agrícolas utilizados durante un periodo de tiempo
OTU	Ocupación de terreno urbano	m x año (Terreno urbano)	Terreno urbano utilizado durante un periodo de tiempo
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.

Cambio climático es la categoría que todos los ACV de energías del océano implementan, debido a la problemática en relación con el fenómeno de calentamiento global que se vive en la actualidad y que ha propiciado a que diferentes países se hayan comprometido a una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El volumen 1 de la Guía Global para Indicadores de Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida (SETAC, 2016) recomienda altamente el uso de este indicador. También recomienda revisar un indicador para afectaciones a la salud relacionadas a la formación de materia particulada, aunque el índice recomendado es a punto final. Thomson et al. (2015), Zhai et al. (2018), Douziech et al (2016) y Uihlein (2016) utilizan la Formación de Materia Particulada como una alternativa a punto medio.

De acuerdo con los inventarios de ciclo de vida de los sistemas analizados, la participación de metales es muy importante en la elaboración de los dispositivos, por lo que evaluar la categoría de impacto de Agotamiento de recursos Minerales como lo hacen Thomson et al. (2015), Zhai et al. (2018), Douziech et al. (2016), es fundamental.

**Tabla 6 Categorías de impacto utilizadas en ACV de energías del océano.**

Categorías utilizadas en diferentes ACV de energías del océano																				
Fuente	Categorías de impacto ReCiPe a punto medio																	Otras		
	C C	A O	A	E	E M	T H	P O F	F M P	E T	E T A	E T M	R I	O T A	O T U	T T N	A A	A M	A C F	Energía	A R A
Douglas et al., 2008	*																		*	
Rule et al., 2009 <sup>2</sup>	*																		*	
Banerjee et al., 2013	*																		*	
Aalbers 2015 <sup>1</sup>	*	*	*	*		*	*		*	*	*									*
Walker et al., 2015 <sup>2</sup>	*																		*	
Uihlein, 2016 <sup>3</sup>	*	*	*	*	*	*		*		*		*								
Douziech et al., 2016.	*					*		*			*						*			
Zhai et al., 2018	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*				*	*		
Thomson et al., 2019	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		

CC- Cambio Climático, AO- Agotamiento de Ozono, A- Acidificación, E- Eutrofización, EM- Eutrofización Marina, TH- Toxicidad Humana, POF- Potencial de Oxidación Fotoquímica, FMP- Formación de Materia Particulada, ET- Ecotoxicidad, ETA- Ecotoxicidad terrestre, ETM, Ecotoxicidad Marina, RI- Radiación Ionizante. OTA. Ocupación de Tierra Agrícola, OTU- Ocupación de Terreno Urbano, TTN- Transformación de Terreno Natural, AA- Agotamiento de Agua, AM- Agotamiento de Metales, ACF- Agotamiento de Combustibles Fósiles, ARA- Agotamiento de Recursos Abióticos. 1) Solo realiza el análisis a Cambio Climático. 2) Aparece como emisiones de CO2 asociadas, lo 3) Utiliza diferentes métodos para calcular los valores de cada categoría

De forma adicional, la participación de las industrias químicas es alta, debido al procesado del acero utilizado en todos los dispositivos, la producción de sustancias como el amoníaco para el sistema OTEC y la elaboración de las membranas utilizadas en el sistema de gradiente salino, por lo cual, evaluar los impactos en toxicidad es importante, como fueron evaluadas por Thomson et al. (2015), Zhai et al. (2018), Douziech et al. (2016), Uihlein (2016) y Aalbers (2015). Por otro lado, debido a que el recurso principal de estos dispositivos son los océanos, evaluar la categoría de Ecotoxicidad Marina es relevante para estos dispositivos, como lo hicieron los autores antes mencionados en Toxicidad Humana, exceptuando a Aalbers (2015).

El agotamiento de ozono es una categoría importante de revisar, debido a al empleo de refrigerantes como fluido de trabajo en el sistema OTEC, además de ser considerado por Thomson et al. (2015), Zhai et al. (2018), Uihlein (2016) y Aalbers (2015).

También se propone la revisión de eutrofización marina. Si bien, la eutrofización de agua fresca estuvo presente en más artículos, es importante revisar la magnitud del impacto para el recurso principal de los sistemas (el océano).

Incluir la categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles, como lo hicieron Thomson et al. (2015), y Zhai et al. (2018) permite revisar la dependencia de los sistemas a los combustibles fósiles.

Por último, se propone la revisión de la categoría de acidificación, como lo plantean Thomson et al. (2015), Zhai et al. (2018), Uihlein (2016) y Aalbers (2015).

De esta forma, las categorías a evaluar en el presente trabajo son las que se muestran en la Tabla 7, mientras que en el Anexo A se presenta la descripción y el método de obtención de los factores de proporción para la modelación de los impactos.

**Tabla 7. Categorías de impacto de la metodología ReCiPe empleadas en el presente trabajo.**

Siglas	Categoría	Unidad
CC	Cambio climático	kg (CO <sub>2</sub> al aire)
AO	Agotamiento de Ozono	kg (CFC-11 al aire)
A	Acidificación	kg (SO <sub>2</sub> al aire)
EM	Eutrofización marina	kg (N al agua)
TH	Toxicidad Humana	kg (14DCB al aire urbano)
FMP	Formación de materia particulada	kg (PM10 al aire)
ETM	Ecotoxicidad marina	kg (14 DCB al agua marina)
AM	Agotamiento de metales	kg (Fe)
ACF	Agotamiento de combustible fósil	kg (Petróleo)

### 3.6. INVENTARIOS CICLO DE VIDA

La primera etapa consistió en el vaciado de la información, por tecnología, por autor y por año de publicación o fuente. Posteriormente se seleccionaron los elementos que podrían ser utilizados para la integración de un “sistema base” para cada tipo de tecnología. En cada sistema base se indicó el nombre de la tecnología, la capacidad neta (la cantidad de energía total producida menos la energía consumida por el sistema) y bruta (la energía total producida por el sistema) y la vida útil.

Considerando la vida útil y la generación, se obtuvo el total de kWh producidos por el dispositivo durante su vida útil. El valor adoptado como Unidad Funcional en este estudio, que corresponde a 1 kWh, se refiere, a la cantidad de los insumos utilizados para el dispositivo a lo largo de su vida útil, entre el total de kWh totales generados.

#### 3.6.1. INVENTARIO OTEC CC

Dada la imposibilidad de escalar los datos utilizados por el grupo de trabajo de CeMIE Océano, la mayor parte Inventario de Ciclo de Vida (Tablas 8 y 9), corresponde a George et al., (1979), el autor reporta información precisa respecto a las cantidades de material utilizados en los diferentes elementos del dispositivo. Información actualizada sobre las tuberías se obtuvo de Vega (2010), mientras que valores de emisión por bombeo se obtuvieron de Dessne (2015).

**Tabla 8. Tabla de datos del sistema OTECC CC**

Dispositivo	OTECC CC	
Generación	50	MW
Vida	30	Años
Generación neta	53.5	MW
Generación bruta	80	MW
Generación total en 30 años	12,653,820,000	kWh

**Tabla 9. Inventario dispositivo OTECC CC**

Inventario OTECC CC									
Construcción									
Elemento	Cantidad	Material	Cantidad	Unidad	Tipo	Total	Unidad	Módulo Ecoinvent 3.4	Fuente
Estructura	1	Concreto	21842.70 301	ton	Entrada	1.1543 8E-06	ton/kWh	RoW: market for concrete, high exacting requirements ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Red de alambre	182509.1 641	m <sup>2</sup>	Entrada	9.6455 5E-06	m <sup>2</sup> /kWh	GLO: market for cast iron ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Acero temporal	1506103. 789	kg	Entrada	7.9597 1E-05	kg/kWh	GLO: market for steel, chromium steel 18/8 ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Acero estructural	3173912. 202	kg	Entrada	0.0001 6774	kg/kWh	GLO: market for reinforcing steel ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Acero galvanizado	1515.996 756	ton	Entrada	8.0119 9E-08	ton/kWh	GLO: market for steel, chromium steel 18/8 ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Soldadura	356.7595 85	m	Entrada	1.8854 6E-08	m/kWh	GLO: market for welding, arc, steel ecoinvent 3.4	George et al., 1979

		Revestimiento de aluminio para pozos de intercambiadores	88972.15	kg	Entrada	4.70215E-06	kg/kWh	GLO: market for metal working, average for aluminium product manufacturing ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Quillas para pozos (aluminio)	97975.95	kg	Entrada	5.17799E-06	kg/kWh	GLO: market for metal working, average for aluminium product manufacturing ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Quillas en la tubería de agua fría	46085	kg	Entrada	2.43558E-06	kg/kWh	GLO: market for metal working, average for aluminium product manufacturing ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Motor de Diésel	4	pieza	Entrada	2.11399E-10	pieza/kWh	GLO: Motorboat production <p-agg>	George et al., 1979
		Generadores	4	pieza	Entrada	2.11399E-10	pieza/kWh	GLO: market for generator, 200kW electrical ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Tanque de Diésel	2	pieza	Entrada	1.05699E-10	pieza/kWh	GLO: market for liquid storage tank, chemicals, organics ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Tanque de Diésel	2	pieza	Entrada	1.05699E-10	pieza/kWh	GLO: market for liquid storage tank, chemicals, organics ecoinvent 3.4	George et al., 1979

		Tanque de emergencia de Diésel	1	pieza	Entrada	5.28497E-11	pieza/kWh	GLO: market for liquid storage tank, chemicals, organics ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Tanque de aceite de Diésel	1	pieza	Entrada	5.28497E-11	pieza/kWh	GLO: market for liquid storage tank, chemicals, organics ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Tubería	453592	kg	Entrada	2.39722E-05	kg/kWh	GLO: market for chromium steel pipe ecoinvent 3.4	George et al., 1979
Tubería de agua fría	1	FRP	386848	kg	Entrada	2.04448E-05	kg/kWh	GLO: market for glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded ecoinvent 3.4	Vega 2010
		Espuma sintética de polietileno	631140	kg	Entrada	3.33555E-05	kg/kWh	GLO: market for polymer foaming ecoinvent 3.4	Vega 2011
Tubería de agua caliente	2	FRP	34.04072	kg	Entrada	3.59808E-09	kg/kWh	GLO: market for glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded ecoinvent 3.4	Vega 2010
		Espuma sintética de polietileno	10982.64	kg	Entrada	1.16086E-06	kg/kWh	GLO: market for polymer foaming ecoinvent 3.4	Vega 2010
Tubería de mezcla	2	FRP	144.43632	kg	Entrada	1.52668E-08	kg/kWh	GLO: market for glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded ecoinvent 3.4	Vega 2010

		Espuma sintética de polietileno	46599.84	kg	Entrada	4.92557E-06	kg/kWh	GLO: market for polymer foaming ecoinvent 3.4	Vega 2010
Intercambiadores de calor	40	Aluminio	142355.3	kg	Entrada	0.000300937	kg/kWh	GLO: market for metal working, average for aluminium product manufacturing ecoinvent 3.4	George et al., 1979
Anclaje	1	Ancla de acero	45359.2	kg	Entrada	2.39722E-06	kg/kWh	GLO: market for steel, chromium steel 18/8 ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Cadena	1371.6	M	Entrada	7.24886E-08	m/kWh	GLO: market for steel, chromium steel 18/8, hot rolled ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Línea de nilón	7.58952	m <sup>3</sup>	Entrada	4.01104E-10	m <sup>3</sup> /kWh	GLO: market for nylon 6-6 ecoinvent 3.4	George et al., 1979
Almacenamiento/ transformación Energía		Turbogenerador	10	pieza	Entrada	5.28497E-10	pieza/kWh	RoW: gas turbine construction, 10MW electrical ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Banco de carga de acero 304	2179.351216	kg	Entrada	1.15178E-07	kg/kWh	GLO: market for steel, chromium steel 18/8, hot rolled ecoinvent 3.4	George et al., 1979
		Contacto	20	pieza	Entrada	1.05699E-09	pieza/kWh	GLO: market for steel, chromium steel 18/8, hot rolled ecoinvent 3.4	George et al., 1979
Conexión		Cable de 3 núcleos, de 13 cm de diámetro	10	km	Entrada	5.28497E-10	km/kWh	GLO: market for cable, three-conductor cable ecoinvent 3.4	Vega 2010

Generación									
Generación	Sustancias utilizadas	Fluido de trabajo	1738413.521	ton	Entrada	9.18746E-05	ton/kWh	RoW: market for ammonia, liquid ecoinvent 3.4	George et al. 1979
		Fluido de trabajo auxiliar	106675.3752	ton	Entrada	5.63776E-06	ton/kWh	RoW: market for ammonia, liquid ecoinvent 3.4	George et al. 1979
		Nitrógeno	75000	ton	Entrada	3.96372E-06	ton/kWh	RoW: market for nitrogen, liquid ecoinvent 3.4	George et al. 1979
	Sustancias liberadas	CO <sub>2</sub> por cambio de temperatura (intercambio de calor)	15137280	kg	Salida	0.0008	kg/kWh	Carbon dioxide	Dessne 2015
		O <sub>2</sub> por extracción de agua caliente	17049376.91	kg	Salida	0.000901054	kg/kWh	Oxygen	Dessne 2015
		N <sub>2</sub> por extracción de agua fría	30445315.9	kg	Salida	0.001609024	kg/kWh	Nitrogen	Dessne 2015
		CO <sub>2</sub> por extracción de agua caliente	219206274.5	kg	Salida	0.011584976	kg/kWh	Carbon dioxide	Dessne 2015
		O <sub>2</sub> producido por extracción de agua fría	7168614.899	kg	Salida	0.000378859	kg/kWh	Oxygen	Dessne 2015
		N <sub>2</sub> por extracción de agua fría	12801098.03	kg	Salida	0.000676534	kg/kWh	Nitrogen	Dessne 2015
		CO <sub>2</sub> por extracción de agua fría	92167905.84	kg	Salida	0.004871042	kg/kWh	Carbon dioxide	Dessne 2015
	Disposición final								
	Concreto	21842.70301	ton	Salida	1.15438E-06	ton/kWh	waste concrete [Waste]	Valores calculados a partir de los insumos	
	Acero	6697143.298	kg	Salida	0.000353942	kg/kWh	Steel scrap [Waste for recovery]		
	Aluminio	286416.25	kg	Salida	0.000308551	kg/kWh	scrap aluminium [Waste]		
	FRP	387026.477	kg	Salida	2.04636E-05	kg/kWh	Glass fibers [Minerals]		

	Espuma sintética Espuma sintética de polietileno	688722.48	kg	Salida	3.9442E-05	kg/kWh	Foam Scrap [Waste for recovery]
	Amoniaco	1845088.896	ton	Salida	9.75123E-05	ton/kWh	ammonia, liquid [allocatable product]
	Nilón	2.54E+08	kg	Salida	2.01E-02	kg/kWh	Nylon 6.6 (PA 6.6) [Waste for recovery]
	Cobre	6380.597627	kg	Salida	5.04243E-07	kg/kWh	Copper scrap [Waste for recovery]

### 3.6.1.1 ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL DISPOSITIVO OTEC CC

En la Tabla 10 se presentan las cantidades de los materiales utilizados para la elaboración del sistema OTECC. Se observa que el material más utilizado es el amoniaco, empleado como fluido de trabajo en la generación de energía. El segundo es el concreto, utilizado en la estructura flotante del sistema. El acero es utilizado tanto en la estructura, como en tuberías, bombas y turbinas; y es el tercer material de mayor uso.

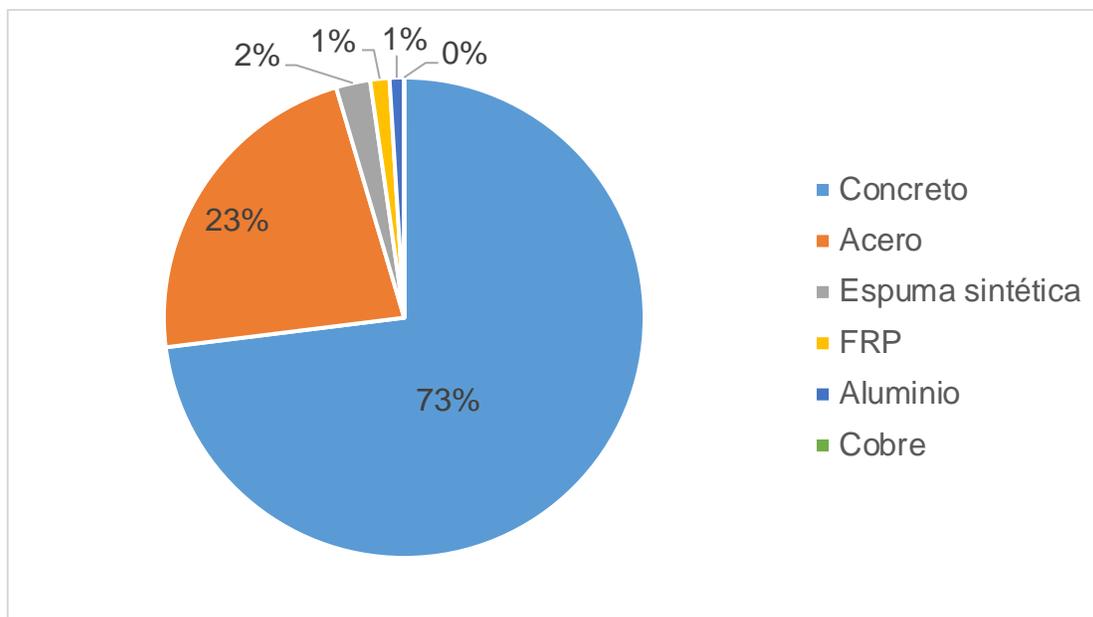
La espuma sintética y el FRP son los elementos principales de las tuberías de extracción de agua del mar, de las cuales, la tubería encargada de la extracción de agua fría debe llegar hasta los mil metros de profundidad, por lo que su requerimiento de materiales también es considerable.

Por otro lado, el aluminio es utilizado principalmente en los intercambiadores de calor y el cobre en el cableado para interconexión a costa.

**Tabla 10. Materiales utilizados en la fabricación del dispositivo OTEC CC**

Material	Cantidad por dispositivo	Unidad	Cantidad por kWh	Unidad
Amoniaco	1845088896	kg	0.097512308	kgkWh
Concreto	21842703.01	kg	1.15E-03	kgkWh
Acero	6697143.29	kg	0.000353942	kgkWh
Espuma sintética	688722.48	kg	3.9442E-05	kgkWh
FRP	387026.47	kg	2.04636E-05	kgkWh
Aluminio	286416.25	kg	0.000308551	kgkWh
Cobre	6380.59	kg	5.04243E-07	kgkWh

Dentro de los insumos utilizados para la fabricación del dispositivo, se observa en la Figura 16, que la mayor parte corresponde al concreto, seguido por el acero, y dejando en solo 3% los materiales asociados a la construcción de las tuberías de agua de mar.



**Figura 16. Proporción de los materiales utilizados para la construcción del dispositivo OTEC CC.**

### 3.6.2. INVENTARIO DEL DISPOSITIVO DE CORRIENTES DE MAREA SEAGEN

El dispositivo SeaGen se utiliza para comparar un dispositivo ya diseñado para un uso comercial, permitiendo la comparación con los otros dispositivos de este trabajo, formados a partir de la literatura y de prototipos. La información utilizada en el Inventario de Ciclo de Vida (Tablas 11 y 12) corresponde a la información obtenida de Douglas (2008).

**Tabla 11. Tabla de datos del sistema de corrientes de marea SeaGen**

Dispositivo	SeaGen	Unidad
Generación	1200	kWh
Vida	20	Años
Generación total en 20 años	189216000	kWh

**Tabla 12. Inventario dispositivo SeaGen**

Inventario SeaGen (corrientes de marea)									
Construcción									
Elemento	Cantidad	Material	Cantidad	Unidad	Tipo	Total	Unidad	Módulo	Fuente
Torre	1	Acero	24200	kg	Entrada	0.00025549	kg/kWh	RoW: steel production, electric, chromium steel 18/8 ecoinvent 3.4	Douglas 2008

		Pintura	7958.76	kg	Entrada	8.40241E-05	kg/kWh	GLO: paint production, for electrostatic painting for aluminium ecoinvent 3.4	Douglas 2008
Cruz	1	Acero	9200	kg	Entrada	9.71284E-05	kg/kWh	GLO: market for steel, unalloyed ecoinvent 3.4	Douglas 2008
		Fibra de vidrio	1150	kg	Entrada	1.2141E-05	kg/kWh	GLO: market for glass fibre ecoinvent 3.4	Douglas 2008
		Espuma de poliuretano	82.14	kg	Entrada	8.67188E-07	kg/kWh	GLO: market for polyurethane, rigid foam ecoinvent 3.4	Douglas 2008
		Epoxi	410	kg	Entrada	4.32855E-06	kg/kWh	RoW: epoxy resin insulator, Al2O3 production ecoinvent 3.4 <u-so>	Douglas 2008
		Acero	920	kg	Residuo	9.71284E-06	kg/kWh	Steel scrap [Waste for recovery]	Douglas 2008
		Fibra de vidrio	115	kg	Residuo	1.2141E-06	kg/kWh	Glass fibers [Minerals]	Douglas 2008
		Espuma de poliuretano	8.2	kg	Residuo	8.65709E-08	kg/kWh	Foam Scrap [Waste for recovery]	Douglas 2008
		Epoxi	41	kg	Residuo	4.32855E-07	kg/kWh	Epoxy resin [Waste for recovery]	Douglas 2008
Cuchillas	2	Acero	1600	kg	Entrada	1.68919E-05	kg/kWh	GLO: market for steel, unalloyed ecoinvent 3.4	Douglas 2008
		Fibra de vidrio	20	kg	Entrada	2.11149E-07	kg/kWh	GLO: market for glass fibre ecoinvent 3.4	Douglas 2008
		Espuma de poliuretano	1.42	kg	Entrada	1.49916E-08	kg/kWh	GLO: market for polyurethane, rigid foam ecoinvent 3.4	Douglas 2008
		Epoxi	7.14	kg	Entrada	7.53801E-08	kg/kWh	RoW: epoxy resin insulator, Al2O3 production ecoinvent 3.4 <u-so>	Douglas 2008

		Acero	160	kg	Residuo	1.68919E-06	kg/kWh	Steel scrap [Waste for recovery]	Douglas 2008
		Fibra de vidrio	2	kg	Residuo	2.11149E-08	kg/kWh	Glass fibers [Minerals]	Douglas 2008
		Espuma de poliuretano	0.14	kg	Residuo	1.47804E-09	kg/kWh	Foam Scrap [Waste for recovery]	Douglas 2008
		Epoxi	0.714	kg	Residuo	7.53801E-09	kg/kWh	Epoxy resin [Waste for recovery]	Douglas 2008
Top	1	Acero	56000	kg	Entrada	0.000591216	kg/kWh	GLO: market for steel, unalloyed ecoinvent 3.4	Douglas 2008
		Fibra de vidrio	700	kg	Entrada	7.3902E-06	kg/kWh	GLO: market for glass fibre ecoinvent 3.4	Douglas 2008
		Espuma de poliuretano	50	kg	Entrada	5.27872E-07	kg/kWh	GLO: market for polyurethane, rigid foam ecoinvent 3.4	Douglas 2008
		Epoxi	250	kg	Entrada	2.63936E-06	kg/kWh	RoW: epoxy resin insulator, Al2O3 production ecoinvent 3.4 <u-so>	Douglas 2008
		Acero	5600	kg	Entrada	5.91216E-05	kg/kWh	GLO: market for steel, unalloyed ecoinvent 3.4	Douglas 2008
		Fibra de vidrio	70	kg	Entrada	7.3902E-07	kg/kWh	GLO: market for glass fibre ecoinvent 3.4	Douglas 2008
		Espuma de poliuretano	5	kg	Entrada	5.27872E-08	kg/kWh	GLO: market for polyurethane, rigid foam ecoinvent 3.4	Douglas 2008
		Epoxi	25	kg	Entrada	2.63936E-07	kg/kWh	RoW: epoxy resin insulator, Al2O3 production ecoinvent 3.4 <u-so>	Douglas 2008
Interconexión	1	Cobre	476.6	kg	Entrada	5.03167E-06	kg/kWh	RoW: copper production, primary ecoinvent 3.4	Douglas 2008

		Polietileno	0.1749	kg	Entrada	1.84649E-09	kg/kWh	RoW: polystyrene production, general purpose ecoinvent 3.4	Douglas 2008
		Acero	3870050	kg	Entrada	0.040857791	kg/kWh	RoW: steel production, electric, chromium steel 18/8 ecoinvent 3.4	Douglas 2008
Cableado	1	Cobre	779.2	kg	Entrada	8.22635E-06	kg/kWh	RoW: copper production, primary ecoinvent 3.4	Douglas 2008
Disposición final									
		Acero	3954370	kg	Salida	0.041747994	kg/kWh	Steel scrap [Waste for recovery]	Valores calculados a partir de los insumos
		Fibra de vidrio	1683	kg	Salida	1.77682E-05	kg/kWh	Glass fibers [Minerals]	
		Espuma de poliuretano	120.22	kg	Salida	1.26921E-06	kg/kWh	Foam Scrap [Waste for recovery]	
		Epoxi	600.426	kg	Salida	6.33896E-06	kg/kWh	Epoxy resin [Waste for recovery]	
		Cobre	1255.8	kg	Salida	1.3258E-05	kg/kWh	Copper scrap [Waste for recovery]	
		Polietileno	0.1749	kg	Salida	1.84649E-09	kg/kWh	Polyethylene (PE) [Waste for recovery]	

### 3.6.2.1. ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL DISPOSITIVO SEAGEN

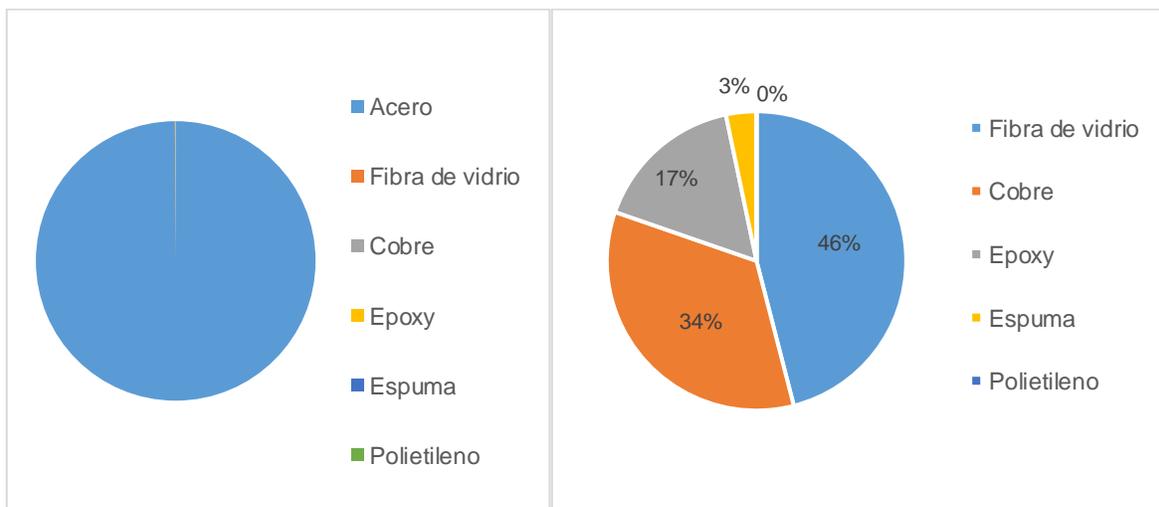
Los materiales utilizados para la fabricación del dispositivo de corrientes de marea SeaGen son mostrados en la Tabla 13. El acero es el material predominante, utilizado principalmente en la elaboración de la torre, que es la estructura de soporte del generador, además de utilizarse en la fabricación de otros elementos importantes como la cruz y las cuchillas.

La fibra de vidrio, el epoxi y la espuma sintética se utilizan en la elaboración de la parte superior de la torre, la cruz y las cuchillas. El cobre es utilizado en el cableado y en la interconexión del sistema a tierra.

**Tabla 13. Materiales utilizados para la fabricación del dispositivo SeaGen**

Material	Cantidad por dispositivo	Unidad	Cantidad por kWh	Unidad
Acero	3954370	Kg	0.041747994	kg/kWh
Fibra de vidrio	1683	Kg	1.77682E-05	kg/kWh
Cobre	1255.8	Kg	1.3258E-05	kg/kWh
Epoxi	600.426	Kg	6.33896E-06	kg/kWh
Espuma	120.22	Kg	1.26921E-06	kg/kWh
Polietileno	0.1749	Kg	1.84649E-09	kg/kWh

En la Figura 17 se observa que el acero representa casi la totalidad del dispositivo. Al considerar el resto de los materiales, sin considerar al acero, se observa que la fibra de vidrio y el cobre son los materiales más utilizados.



**Figura 17. Utilización de materiales para la fabricación del generador SeaGen.**

### 3.6.3. INVENTARIO DEL DISPOSITIVO DE CORRIENTES MARINAS HIDROGENERADOR IMPULSA

El hidrogenerador impulsa es un prototipo que está siendo utilizado por CeMIE Océano, la información de su inventario (Tablas 14 y 15) se obtuvo gracias al Dr. Ismael Mariño del CINVESTAV-Merida.

**Tabla 14. Tabal de datos sistema de corrientes marinas Hidrogenerador IMPULSA**

Dispositivo	Hidrogenerador IMPULSA	
Generación	500	Wh
Vida	10	años
Generación total en 10 años	43,800,000	kWh

**Tabla 15. Inventario del dispositivo Hidrogenerador IMPULSA**

Inventario Hidrogenerador IMPULSA								
Construcción								
Elemento	Material	Cantidad	Unidad	Tipo	Total	Unidad	Módulo Ecoinvent 3.4	Fuente
Concentrador (carcaza)	Fibra de vidrio	100	Kg	Entrada	0.002289377	kg/kWh	GLO: market for glass fibre ecoinvent 3.4	Dr. Ismael Mariño (CeMIE-Océano)
Alabes	Aluminio / fibra de carbón	200	Kg	Entrada	0.004578755	kg/kWh	GLO: market for aluminium alloy, ALi ecoinvent 3.4	Dr. Ismael Mariño (CeMIE-Océano)
Rotores	Fibra de carbón o acero	200	Kg	Entrada	0.004578755	kg/kWh	GLO: market for steel, chromium steel 18/8 ecoinvent 3.4	Dr. Ismael Mariño (CeMIE-Océano)
Anclaje	Concreto / fierro	1	Ton	Entrada	2.28938E-05	ton/kWh	GLO: market for concrete, 35MPa ecoinvent 3.4	Dr. Ismael Mariño (CeMIE-Océano)
Tensor	Acero	1	Ton	Entrada	2.28938E-05	ton/kWh	GLO: market for wire drawing, steel ecoinvent 3.4	Dr. Ismael Mariño (CeMIE-Océano)
Disposición final								
	Fibra de vidrio	100	Kg	Salida	0.002289377	kg/kWh	Glass fibers [Minerals]	Valores calculados a partir de los insumos
	Aluminio	200	Kg	Salida	0.004578755	kg/kWh	scrap aluminium [Waste]	
	Acero	1200	Kg	Salida	0.027472527	kg/kWh	Steel scrap [Waste for recovery]	
	Concreto	1	Ton	Salida	2.28938E-05	ton/kWh	w aste concrete [Waste]	

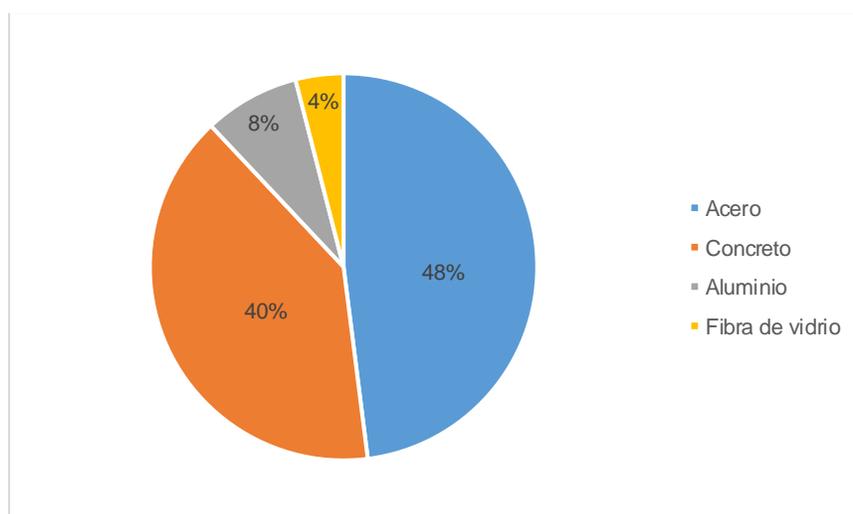
### 3.6.3.1. ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL DISPOSITIVO DE CORRIENTES MARINAS HIDROGENERADOR IMPULSA

En la Tabla 16 se presenta la cantidad de material utilizado por el dispositivo Hidrogenerador IMPULSA, el acero utilizado en los rotores y el concreto utilizado en el sistema de anclaje, son los materiales que se requiere mayor cantidad, mientras que el aluminio utilizado en las alabes y la fibra

de vidrio utilizado en la carcasa, representarían un 8% y 4% del total de los materiales, respectivamente, como se muestra en la Figura 18.

**Tabla 16. Materiales utilizados en la Fabricación del Hidrogenerador IMPULSA.**

Material	Cantidad por dispositivo	Unidad	Cantidad por kWh	Unidad
Fibra de vidrio	100	kg	0.002289377	kg/kWh
Aluminio	200	kg	0.004578755	kg/kWh
Acero	1200	kg	0.027472527	kg/kWh
Concreto	1000	Kg	2.28938E-05	kg/kWh



**Figura 18. Materiales utilizados en la fabricación del Hidrogenerador IMPULSA.**

### 3.6.4. INVENTARIO DEL DISPOSITIVO DE GRADIENTE SALINO POR ELECTRODIÁLISIS INVERSA (RED)

Para integrar el Inventario de Ciclo de Vida del dispositivo de gradiente salino (Tablas 17 y 18), se utilizó información de la literatura, principalmente de Veerman et al. (2009; 2010), Post et al. (2010) y Asahi Glass Co. LTD. También se utilizó información proporcionada por CeMIE Océano, principalmente por el grupo de Trabajo de la Dra. Cecilia Enriquez de la FC-Sisal, UNAM.

**Tabla 17. Tabla de datos del sistema de Gradiente Salino RED**

Dispositivo	Gradiente salino RED	
Generación	200	kWh
Vida	30	años
Generación total en 30 años	6372900000	kWh

Tabla 18. Inventario del dispositivo de Gradiente Salino RED

Inventario Gradiente salino RED									
Construcción									
Elemento	Cantidad	Material	Cantidad	Unidad	Tipo	Total	Unidad	Módulo Ecoinvent 3.4	Fuente
Pila (stack)	17857	Poliétileno UHMW	38.57142857	ton	Entrada	2.42097E-08	ton/kWh	GLO: market for polyethylene, high density, granulate ecoinvent 3.4	Dra. Cecilia Enriques (CeMIE-Océano)
		Espaciadores Nitex 03-300/51, Sefar	13392.85714	kg	Entrada	8.40613E-06	kg/kWh	GLO: market for nylon 6-6 ecoinvent 3.4	Veerman 2010
		Empaque de silicona	521.1021429	kg	Entrada	3.27074E-07	kg/kWh	RER: silicone product production ecoinvent 3.4	Dra. Cecilia Enriques (CeMIE-Océano)
		Anodo de Titanio recubierto con oxido de RU	178.5714286	m <sup>2</sup>	Entrada	1.12082E-07	m <sup>2</sup> /kWh	GLO: titanium production, primary ecoinvent 3.4	Veerman 2010
		Catodo de Titanio recubierto con oxido de IR	29.76190476	m <sup>2</sup>	Entrada	1.86803E-08	m <sup>2</sup> /kWh	GLO: titanium production, primary ecoinvent 3.4	Veerman 2010
		Pernos de acero inoxidable	285714.2857	piezas	Entrada	0.000179331	pieza/kWh	EU-28: Fixing material screws stainless steel (EN15804 A1-A3) ts	Veerman 2009
Membrana	461186.5	Estireno	121361485.2	kg	Entrada	0.076173475	kg/kWh	GLO: market for styrene ecoinvent 3.4	Asahi Glass Co. LTD
		Dibinilbenzeno	77382978.24	kg	Entrada	0.048570025	kg/kWh	GLO: market for benzene ecoinvent 3.4	Asahi Glass Co. LTD
Pretratamiento	2	Filtro de tambor rotatorio de acero inoxidable	1800	kg	Entrada	1.12978E-06	kg/kWh	GLO: market for steel, unalloyed ecoinvent 3.4	Post et al., 2010

Transformador	1	Transformador de pedestal trifasico (mayormente cobre)	2200	kg	Entrada	1.38085E-06	kg/kWh	GLO: transformer production, low voltage use ecoinvent 3.4	CeMie-Océano
Bombeo	2976.190476	Bomba peristaltica	20.8333333	ton	Entrada	1.30762E-08	kg/kWh	GLO: market for steel, unalloyed ecoinvent 3.4	Dra. Cecilia Enriques (CeMIE-Océano)
	2	Bomba agua salada	502	kg	Entrada	3.15084E-07	kg/kWh	GLO: market for steel, unalloyed ecoinvent 3.5	Post et al., 2010
	2	Bomba agua dulce	502	kg	Entrada	3.15084E-07	kg/kWh	GLO: market for steel, unalloyed ecoinvent 3.6	Post et al., 2010
<b>Disposición final</b>									
		Poliutileno	38.57142857	ton	Salida	2.42097E-08	ton/kWh	Polyethylene (PE) [Waste for recovery]	Valores calculados a partir de los insumos
		Nilón	13392.85714	kg	Salida	8.40613E-06	kg/kWh	Nylon 6.6 (PA 6.6) [Waste for recovery]	
		Silicón	521.1021429	kg	Salida	3.27074E-07	kg/kWh	Silicon [Inorganic intermediate products]	
		Titanio	208.3333333	m <sup>2</sup>	Salida	1.30762E-07	m <sup>2</sup> /kWh	Titanium [Metals]	
		Acero	311551.619	kg	Salida	0.000195548	kg/kWh	Steel scrap [Waste for recovery]	
		Membranas	198744463.4	kg	Salida	0.1247435	kg/kWh	membranas [Others]	

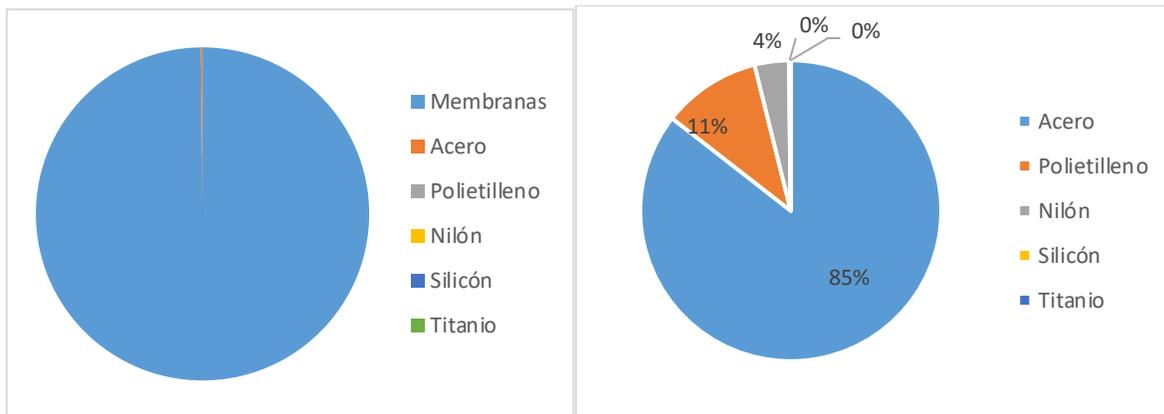
### 3.6.4.1. ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL DISPOSITIVO DE GRADIENTE SALINO RED

Para la construcción del dispositivo de generación por Gradiente Salino RED, lo más importante son las membranas. Para este caso se modeló el sistema con membranas hechas principalmente de estireno. La eficiencia de las membranas está ligada a la eficiencia de generación del dispositivo, por lo que entre mayor sea la eficiencia de las membranas, será menor la cantidad de membranas a utilizar, reduciendo los impactos por la cantidad de material requerido. El acero es principalmente utilizado en los sistemas de filtración, pernos de unión y bombas. La pila está formada por tapas de polietileno, espaciadores de nilón, y sellos de silicón, mientras que el titanio se utilizó para los electrodos (Tabla 19).

**Tabla 19. Materiales utilizados en la fabricación del dispositivo de Gradiente Salino RED**

Material	Cantidad por dispositivo	Unidad	Cantidad por kWh	Unidad
Membrana	198744463.4	kg	0.1247435	kg/kWh
Acero	311551.619	kg	0.000195548	kg/kWh
Polietileno	38571.42857	Ton	2.42097E-08	Ton/kWh
Nilón	13392.85714	kg	8.40613E-06	kg/kWh
Silicón	521.1021429	kg	3.27074E-07	kg/kWh
Titanio	188.00055	kg	1.18E-07	kg/kWh

En la Figura 19 se presentan la proporción en la que se utilizaron los principales materiales para la fabricación del dispositivo. Las membranas, como elemento, tienen la mayor relevancia proporcional, seguidas del acero y el polietileno.



**Figura 19. Utilización de materiales para la fabricación del dispositivo de gradiente salino RED.**

### 3.6.5.MIX ELÉCTRICO MEXICANO

El Mix eléctrico Mexicano representa la forma en la que se produce la electricidad en nuestro país, por lo que es considerada la forma convencional de producción de energía eléctrica.

Las tecnologías generalmente utilizadas para la generación incluyen los sistemas termoeléctricos (ciclo de vapor, ciclo combinado, turbinas y combustión interna), que representan alrededor del 68% de la generación; la generación por plantas carbónicas representa alrededor del 12.9% de la generación, lo que indica que alrededor del 82% de la generación está asociada a fuentes fósiles. Las plantas hidroeléctricas representan un 11%, seguido por los sistemas nucleares y geotérmicos con 4% y 2.3%, respectivamente. Los sistemas eólicos y fotovoltaicos en conjunto representan un 0.9% de la generación (SENER, 2016).

Al ser el sistema convencional de generación eléctrica de México, se utiliza para comparar los valores de impacto de los dispositivos evaluados en este trabajo. Se utilizó la información presente en la base

de datos Ecoinvent3.4 para la obtención de los valores de impacto del Mix eléctrico Mexicano, y se presentan en el Anexo B, seguido de los resultados completos de los dispositivos de este trabajo.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. ANALISIS GENERAL

La Figura 20 presenta los resultados generales normalizados y en términos porcentuales, para todas las categorías de impacto de los cuatro sistemas de generación de energía analizados.

En la Figura 20 podemos observar que el hidrogenerador IMPULSA, es el sistema que mayor impacto presenta en las categorías de impacto de cambio climático (representando cerca del 36% del total), toxicidad humana (alrededor del 43% del impacto), ecotoxicidad marina (alrededor del 63% del impacto), formación de materia particulada (29.8%), agotamiento de recursos minerales (71%) y acidificación (28.6%). Es el segundo en eutrofización marina (aporta el 13% del impacto), agotamiento de ozono (con una participación de 21% del impacto) y el tercero en agotamiento de combustibles fósiles (20%). Estos resultados están asociados a la elaboración del acero utilizado y a su tratamiento para el reciclaje.

Lo anterior se debe a que el sistema de corrientes oceánicas, Hidrogenerador IMPULSA, es un sistema prototipo con el cual se espera evaluar la posibilidad de extracción de energía de las corrientes marinas, por lo que se diseñó para una generación y con un tiempo de vida esperado bajos, en comparación con otros dispositivos. Esto está asociado a los relativamente altos impactos producidos por este sistema.

El sistema de corrientes de marea, generador SeaGen no presenta un impacto significativo, en términos comparativos, en ninguna de las categorías evaluadas, sin embargo, presenta relevancia en las categorías de toxicidad humana (26% del total), agotamiento de recursos minerales (22%) y acidificación (25%) presentando el segundo lugar de relevancia en dichas categorías (Figura 19), debido a que se requiere una gran cantidad de acero para la elaboración de la torre que sostiene las turbinas. Es el tercero en eutrofización marina al representar 6% del total del impacto y en la categoría de formación de materia particulada aporta el 23.6%, mientras que es el sistema con menor impacto en las categorías de cambio climático (0.68%), agotamiento de combustibles fósiles (0.44%), ecotoxicidad marina (1.3%) y agotamiento de ozono (9.7%).

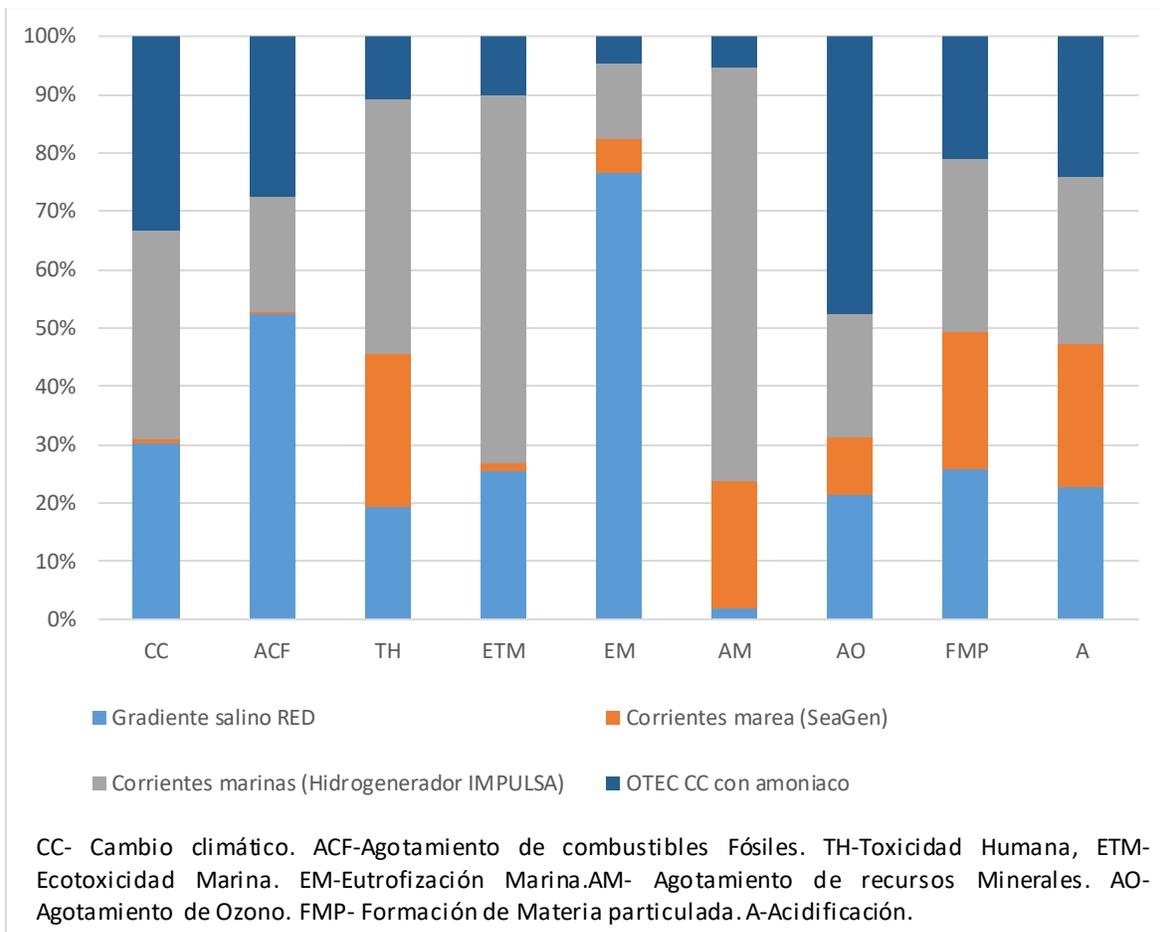
El sistema de Gradiente Salino por Electrodialisis Inversa (RED) requiere el empleo de sustancias como estireno y dibinilbenzeno para la producción de las membranas, y la producción de estos compuestos es la responsable de su relevancia en las categorías de Eutrofización Marina, representando el 76.7% del impacto, mientras que, la categoría de agotamiento de combustibles fósiles representa el 52.2% del impacto. Es el segundo sistema más relevante en ecotoxicidad marina, representando el 25.5% del impacto, en agotamiento de ozono representa el 21.4% y en formación de materia particulada representa el 25.6%. Representa el tercer lugar de relevancia en las categorías de cambio climático, con 30.26% del impacto, toxicidad humana con 19.3% del impacto y es el sistema con menor relevancia para las categorías de impacto de agotamiento de recursos minerales, pues representa el 2% y acidificación donde representa el 22.59%.

El sistema OTEC CC, es el que presenta mayor relevancia en la categoría de impacto de agotamiento de ozono (47.5%), asociado a la producción del amoníaco utilizado para la generación de electricidad. El sistema se encuentra en segundo lugar para las categorías de impacto de cambio climático y agotamiento de combustibles fósiles, para las cuales representa el 33.26% y el 27.55% del impacto, respectivamente. Representa el tercer lugar para las categorías de impacto de ecotoxicidad marina

(9.97%), agotamiento de recursos minerales (5.5%) y acidificación (24.22%). Es el sistema que menores impactos tiene asociados a las categorías de toxicidad humana con una aportación del 10.92%, eutrofización marina, con 4.5% del impacto y formación de materia particulada con 20.9% de aporte.

El hidrogenador IMPULSA es el sistema que genera mayores impactos en seis categorías, seguido por el sistema de gradiente salino RED, que es el de mayor relevancia en dos categorías y el sistema OTEC CC, en una. El generador SeaGen, no es el sistema con mayor impacto para ninguna categoría, aunque si es el que menos impactos tienen asociados en las categorías de cambio climático, agotamiento de combustibles fósiles, ecotoxicidad marina y eutrofización marina. El sistema OTEC CC es el de menor impacto en tres categorías y el sistema de gradiente salino lo es en dos categorías.

El sistema OTEC CC cuenta con una generación de 50 MW, la más alta de los cuatro sistemas evaluados. Debido a esto, los impactos asociados a 1 kWh promedio son menores que los del hidrogenador IMPULSA y que los del sistema de gradiente salino, que en la realidad aun no llega a las eficiencias esperadas.



**Figura 20. Impactos normalizados para los cuatro sistemas.**

El sistema SeaGen es un sistema probado y diseñado para operar de forma comercial, por lo que presenta menores impactos al Hidrogenador IMPULSA, que aún es un sistema prototipo. También tiene mejor desempeño que el sistema de gradiente salino, debido a que aún no se ha logrado llegar a las eficiencias que conviertan a esta tecnología en una opción competitiva. En este trabajo se

consideró un valor de  $0.7 \text{ W/m}^2$  de membrana, como un valor aceptable de generación para el sistema de gradiente salino, aunque Daniliidis et al. (2014) menciona haber obtenido en un piloto  $2.2 \text{ W/m}^2$ , sin embargo, es necesario buscar el aumento de la densidad de generación para poder reducir la cantidad de membrana utilizada y por ende los impactos asociados a esta tecnología. Actualmente REAPower está buscando mejorar la eficiencia de las membranas, llegando a proponer como posible valor de densidad de generación  $21.5 \text{ W/m}^2$ , que resultaría en una reducción de los impactos asociados a esta tecnología (REAPower, 2014)

Es importante mencionar para todos los dispositivos, que, aunque no es necesariamente parte del sistema de generación de energía, aquí se incorporó el proceso de reciclado para llevar a un fin apropiado a los materiales involucrados. Esto quiere decir que se están incorporando los impactos asociados a los procesos de reciclaje de materiales a nuestro sistema. De esta forma se está produciendo un nuevo producto, cuyos impactos de fabricación son menores a los impactos asociados a utilizar materias primas vírgenes.

#### 4.1.1. OTEC CC

En la Figura 21 se observa que la mayor relevancia de los impactos en todas las categorías de este sistema se encuentra en la etapa de generación, exceptuando para la categoría de agotamiento de recursos minerales, donde los procesos de reciclaje tienen mayor impacto, debido al requerimiento de insumos. Los valores en las demás categorías están asociados a la producción del amoníaco necesario para la generación de  $1 \text{ kWh}$  durante la vida del sistema.

La etapa de fin de vida es la siguiente con mayor relevancia en todas las categorías, principalmente por los insumos utilizados para el reciclaje del aluminio de los intercambiadores de calor y del acero. La etapa de construcción tiene gran relevancia para los desarrolladores, debido a la selección de materiales y procesos de fabricación, que cumplan con las características que el sistema requiere, aunque para este caso no se presentan valores relativamente altos respecto a las otras tecnologías revisadas en este proyecto.

Si se revisan los impactos asociados a los elementos que integran el sistema en la Figura 23, se observa que la construcción de la estructura es la que presenta una mayor relevancia en todas las categorías exceptuando la categoría de impacto de Eutrofización Marina, debido a la cantidad de acero y concreto utilizado. Los intercambiadores de calor son el siguiente elemento de mayor relevancia general en cuanto a valor de impacto, así como, un elemento de gran importancia para la generación de energía mediante sistemas OTEC.

Para la etapa de construcción, la estructura es el elemento más relevante en 8 de las 9 categorías, siendo el segundo solo en eutrofización marina, donde tienen mayor relevancia los intercambiadores de calor. En agotamiento de recursos minerales, casi todo el impacto se ve representado por la estructura. Los intercambiadores de calor son el siguiente elemento con mayor relevancia, siendo los de mayor aporte a la categoría de eutrofización marina y representando el segundo elemento de mayor relevancia en siete categorías. Los siguientes elementos de importancia son el elemento de almacenamiento y generación, que contiene principalmente a las turbinas y la tubería de agua fría mayormente compuesta de FRP y espuma sintética. Las bombas solo tienen una participación relevante en la categoría de agotamiento de ozono.

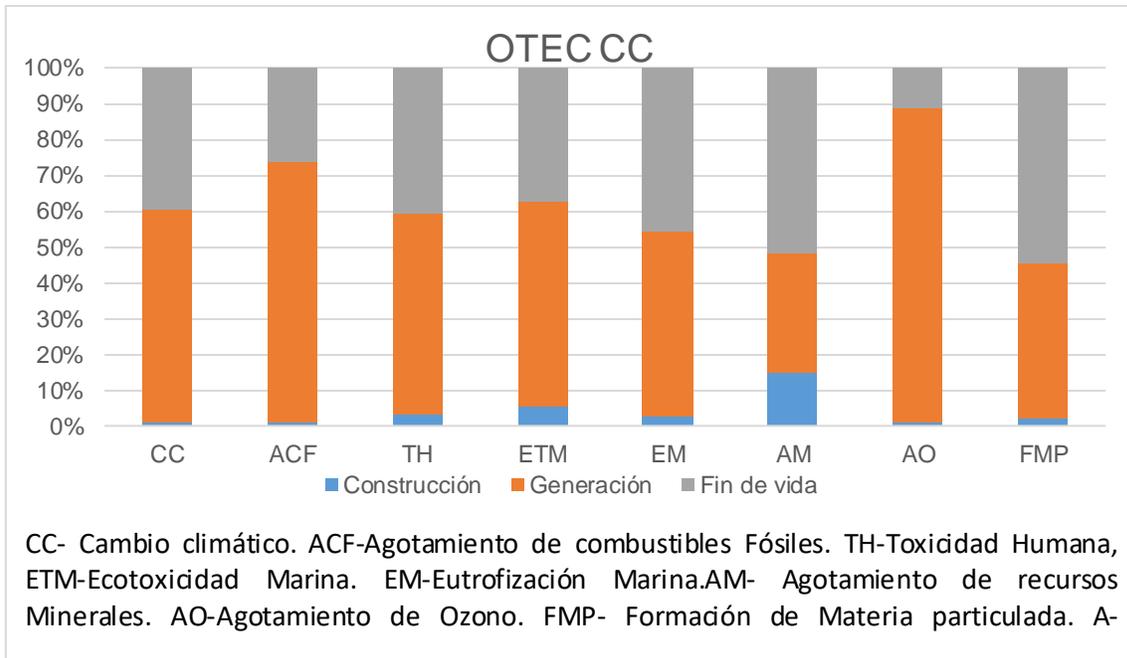


Figura 21. Impactos normalizados para el sistema OTEC CC

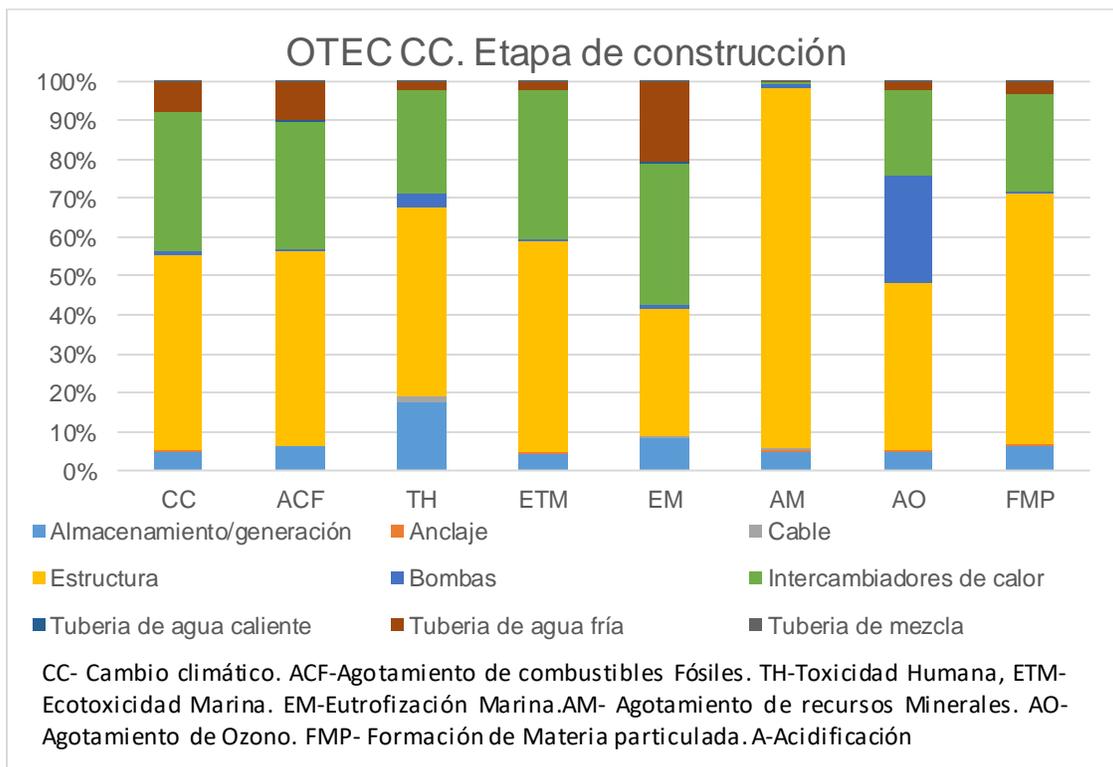


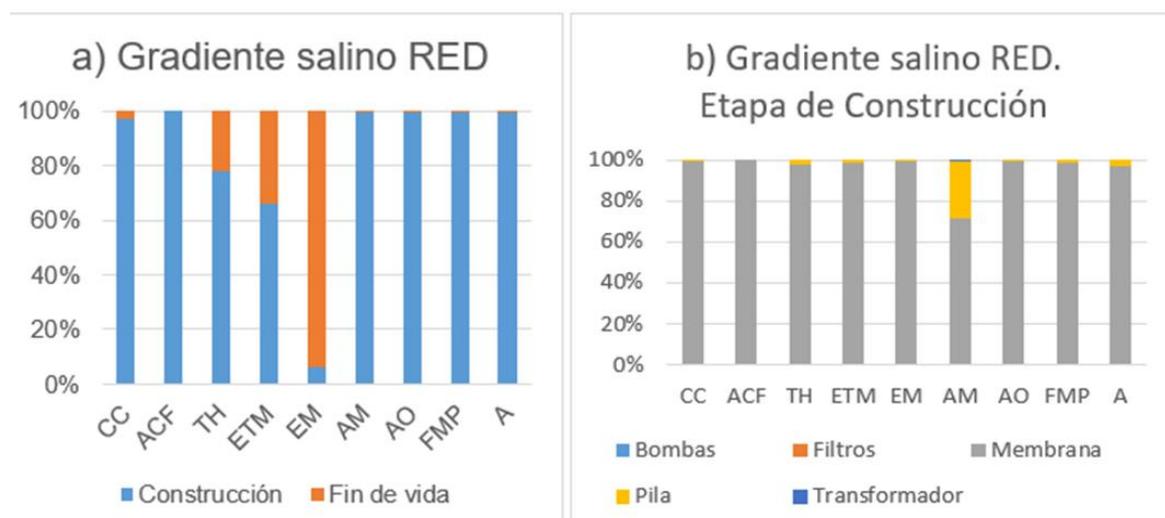
Figura 22. Impactos normalizados para la etapa de construcción del sistema OTEC CC

## 4.1.2. GRADIENTE SALINO

Como se observa en la Figura 23, el análisis del sistema de gradiente salino señala que la etapa más relevante en la mayoría de las categorías de impacto es la etapa de construcción, es evidente que el elemento con mayor participación en todas las categorías son las membranas y con una menor contribución las pilas. También se observa que la etapa de fin de vida tiene mayor predominancia en la categoría de impacto de eutrofización marina.

## 4.1.3. CORRIENTES MARINAS Y DE MAREA.

El sistema Hidrogenerador IMPULSA que utiliza las corrientes marinas, presenta mayores impactos en la etapa de construcción para 5 categorías de impacto: toxicidad humana, ecotoxicidad marina, eutrofización marina, agotamiento de ozono, formación de materia particulada y acidificación. Como se observa en la Figura 24, los alabes son el elemento que mayor importancia presenta en todas las categorías de impacto, y en segundo lugar el rotor.

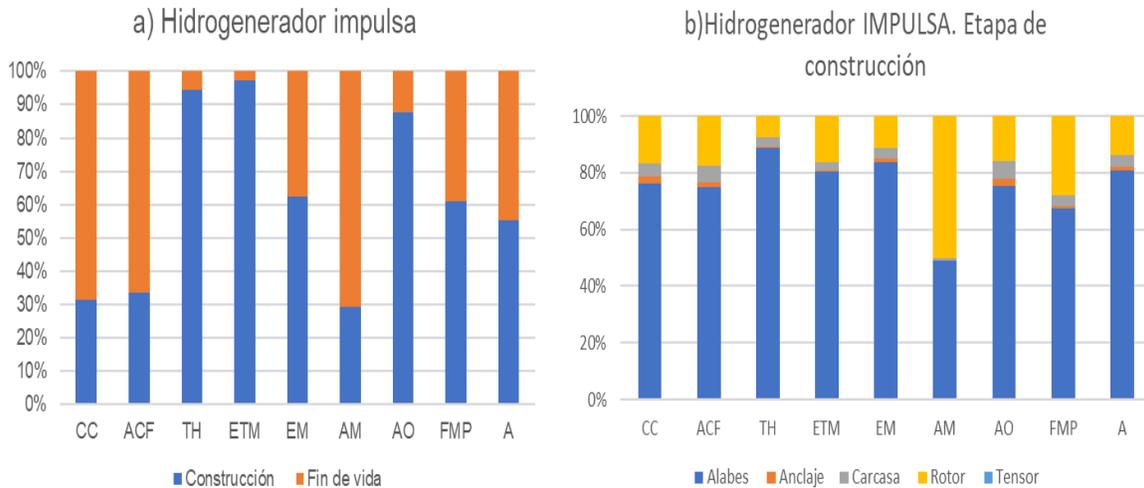


CC- Cambio climático. ACF-Agotamiento de combustibles Fósiles. TH-Toxicidad Humana, ETM-Ecotoxicidad Marina. EM-Eutrofización Marina. AM- Agotamiento de recursos Minerales. AO-Agotamiento de Ozono. FMP- Formación de Materia particulada. A- Acidificación

**Figura 23. Impactos normalizados para el sistema de Gradiente Salino RED, a) resultados porcentuales para las etapas de construcción y fin de vida y b) resultados porcentuales para la etapa de construcción.**

Mientras tanto, para el sistema SeaGen (Figura 25), los impactos producidos por los procesos de reciclaje tienen como resultado mayores impactos en la etapa de fin de vida que en la etapa de construcción, exceptuando la categoría de agotamiento de metales.

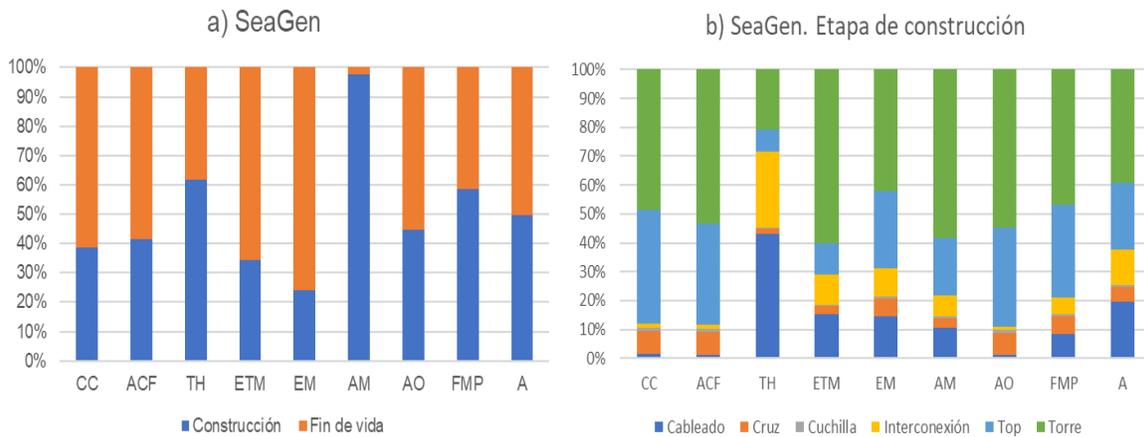
En su etapa de construcción, la torre es el elemento más grande y el que mayor cantidad de material requiere, razón por la cual la mayoría de los impactos están relacionados a este elemento, seguido por la parte superior de la torre (Top).



CC- Cambio climático. ACF-Agotamiento de combustibles Fósiles. TH-Toxicidad Humana, ETM-Ecotoxicidad Marina. EM-Eutrofización Marina.AM-Agotamiento de recursos Minerales. AO-Agotamiento de Ozono. FMP- Formación de Materia particulada. A-Acidificación

**Figura 24. Impactos normalizados para el Hidrogenerador IMPULSA, a) resultados porcentuales para las etapas de construcción y fin de vida, b) resultados porcentuales para la etapa de construcción.**

La interconexión y el cableado tienen especial importancia en la categoría de Toxicidad Humana ya que se relaciona con la elaboración del cobre como material principal y a los recubrimientos especiales que éste lleva.



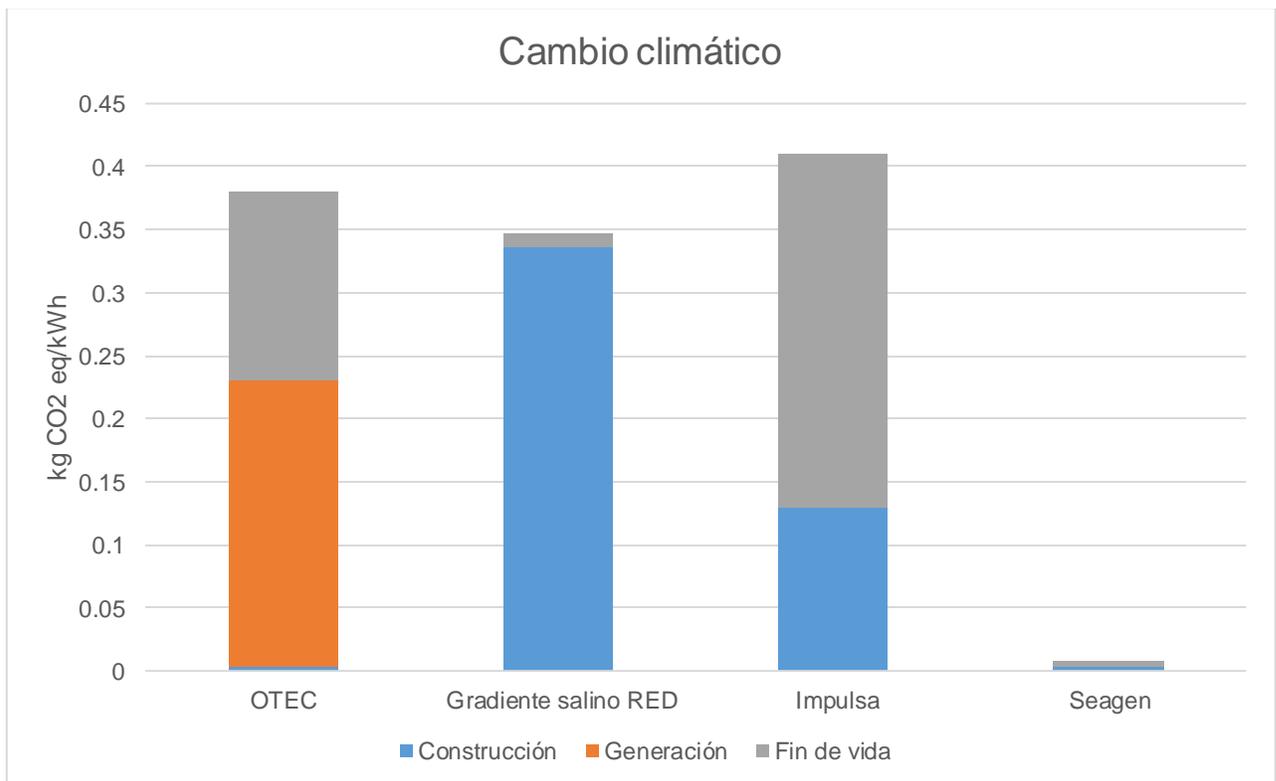
CC- Cambio climático. ACF-Agotamiento de combustibles Fósiles. TH-Toxicidad Humana, ETM-Ecotoxicidad Marina. EM-Eutrofización Marina.AM-Agotamiento de recursos Minerales. AO-Agotamiento de Ozono. FMP- Formación de Materia particulada. A-Acidificación

**Figura 25. Impactos normalizados para el generador SeaGen, a) valor porcentual en las etapas de construcción y fin de vida, b) valor porcentual en la etapa de construcción.**

## 4.2. EVALUACIÓN DE IMPACTO POR CATEGORÍA

### 4.2.1. CAMBIO CLIMÁTICO (CC)

Como se observa en la Figura 26, el sistema con mayor impacto en la categoría de cambio climático es el sistema Hidrogenerador IMPULSA con 0.411 kg de CO<sub>2</sub> eq/kWh, debido a que, en su etapa de fin de vida, alrededor de 1400 kg de metales son enviados a procesos de reciclaje, mientras que 1 ton de concreto llega al relleno sanitario como disposición final. Uihlein (2016) presenta valores para turbinas de eje vertical y horizontal en los rangos de 0.023 kg de CO<sub>2</sub> eq/kWh y 0.07 kg de CO<sub>2</sub> eq/kWh, en este sentido, el Hidrogenerador IMPULSA requiere mejorar sus capacidades de generación eléctrica respecto a la cantidad de material utilizado para su fabricación.



**Figura 26. Categoría de Impacto de Cambio Climático para los 4 sistemas evaluados.**

El segundo sistema con mayor impacto es el sistema OTEC CC, presentando en su etapa de generación una contribución del 59% del impacto total de 0.382 kg de CO<sub>2</sub> eq/kWh, valor que difiere del presentado por Aalbers (2015), manejando para una planta de 10 MW un valor de impacto 0.0428 kg de CO<sub>2</sub> eq/kWh, esta diferencia puede estar relacionado a la capacidad de la planta, ya que es una planta de solo el 20% de la capacidad del sistema modelado en este trabajo. Estos impactos son asociados a la producción del fluido de trabajo necesario, en este caso, amoniaco, más no a los impactos producidos directamente por el fluido.

El sistema de gradiente salino RED presenta valores de 0.347 kg de CO<sub>2</sub> eq/kWh y el generador SeaGen 0.0078 kg de CO<sub>2</sub> eq/kWh, por lo que se considera el sistema con menor contribución de impacto para esta categoría de los sistemas analizados en este trabajo.

En la Tabla 20, se presentan otros valores para sistemas de conversión de energía del océano reportados en la literatura para la categoría de cambio climático, se puede observar que, exceptuando el generador SeaGen, los demás sistemas estudiados en este trabajo presentan valores mayores que los reportados por otros sistemas de generación de energía a partir del océano, los cuales están diseñados a escala comercial.

**Tabla 20. Valores para la categoría de impacto de Cambio Climático, para diferentes sistemas de generación de energía a partir del océano, reportados en diferentes fuentes.**

Fuente	Sistema	Valor	Unidad
Aalbers, 2015	OTEC	0.002065	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
Uihlen, 2016	Turbina de eje vertical	0.0231	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
	WEC Atenuador	0.0437	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
	WEC por absorción puntual	0.1045	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
Parker, 2007	WEC Pelamis	0.0228	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
Walker et al., 2015	TGL	0.0342	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
	Open Hydro	0.0196	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
	Flumill	0.0185	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
	Scotrenowable	0.0238	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
Douziech, 2016	HS1000	0.037	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
	Hydra Tidal	0.02017	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
	Oyster800	0.0655	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
	Annapolis	0.0039	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
	SeaGen	0.0255	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
Thomas, 2019	WEC	0.035	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
Gastelum, 2017	WEC	0.04	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
Este trabajo	OTEC CC	0.382	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
	Gradiente salino RED	0.347	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
	Hidrogenador IMPULSA	0.411	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
	SeaGen	0.0078	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh

Los cuatro sistemas analizados en este estudio presentan un valor de impacto en la categoría de cambio climático menor al registrado cuando se genera 1 kWh con el Mix de generación eléctrico de México, que alcanza un valor de 0.511 kg de CO<sub>2</sub> eq/kWh de acuerdo a la información de la base de datos Ecoinvent3.4, indicando que realmente pueden presentarse como sistemas más limpios, respecto al impacto de cambio climático que el sistema convencional de generación de energía eléctrica.

Como se observa en la Figura 26 el sistema OTEC CC presenta mayor valor de impacto, después del hidrogenador IMPULSA. Lo anterior se debe al uso del amoníaco en la etapa de generación (Figura 27), ya que este compuesto es el elemento que mayor relevancia tiene en la categoría de Cambio Climático, generando 0.208 kg de CO<sub>2</sub> eq/kWh debido a la producción de la sustancia y no al uso en la planta OTEC CC, representando cerca del 50% de los impactos asociados a OTEC CC, esto difiere

de lo reportado por Aalbers (2015), pues de sus resultados, se puede inferir que el impacto asociado a la producción del amoniaco es de alrededor de 0.000014 kg de CO<sub>2</sub> eq/kWh (0.0036% del total). Es importante mencionar que el amoniaco es una sustancia con potencial de cambio climático, sin embargo, dado que no se cuentan con datos para modelar la emisión directa del amoniaco por fugas a la atmosfera por parte del sistema, los valores presentes son los asociados a la producción del amoniaco.

La producción del amoniaco tiene asociada la emisión de CO<sub>2</sub> principalmente, seguido de metano, cuyo potencial de calentamiento global a 100 años es de 25, y sustancias inorgánicas como el óxido nitroso, el hexafluoruro de azufre y el trifluoruro de nitrógeno, con potenciales de calentamiento global de 298, 22,800, y 17,200, respectivamente (GHG Protocol, 2016). Además, en la misma etapa, por bombeo e intercambio de calor se liberan 0.0173 kg de CO<sub>2</sub> eq/kWh.

Bicer et al. (2016), mencionan que la producción convencional de amoniaco tiene relacionada la emisión de 1.5 kg de CO<sub>2</sub>/kg de amoniaco, y propone diferentes alternativas para su producción con un menor impacto, una de éstas es la producción de amoniaco por electrolisis de residuos municipales con 0.34 kg de CO<sub>2</sub> /kg de amoniaco y otra es producirlo por electrolisis de biomasa con una generación de 0.85 kg de CO<sub>2</sub> eq/kg.

En la etapa de fin de vida del sistema OTEC CC, el mayor impacto se debe al reciclaje del aluminio en la producción de aluminio como aleación para vaciado de losas, presentando un valor de 0.145 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh. Esto se debe a que para la producción de 1 kg aluminio solo se utiliza 0.05 kg de aluminio reciclado (Ecoinvent3.4). Por su parte, Al Hawari et al. (2014) reporta que la cantidad de aluminio reciclado utilizado en la producción de aluminio primario es de 4%. Adicionalmente, reporta que, la mayor parte del impacto en la cadena de proceso del aluminio se genera en la planta de poder al generar la energía necesaria para la producción.

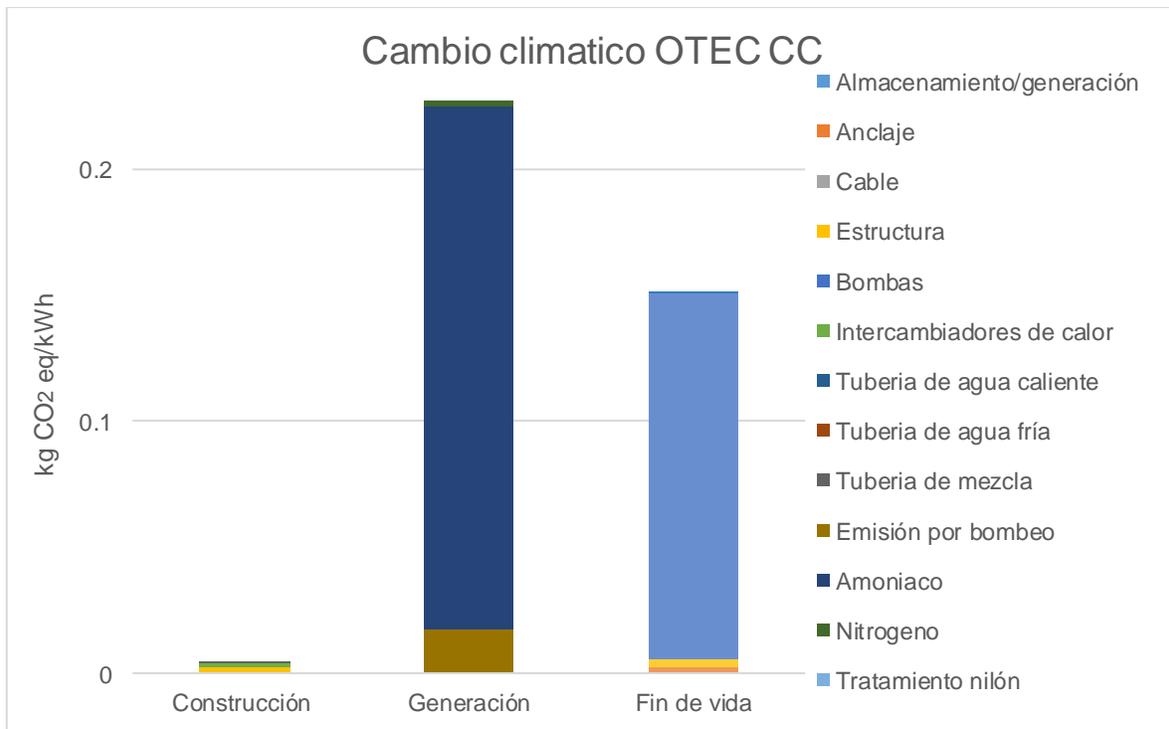


Figura 27. Valores de impacto de la categoría de Cambio Climático para el sistema OTEC CC.

Centrándose en la etapa de construcción del sistema OTEC CC (Figura 28), la estructura, como consecuencia de las grandes cantidades de acero y concreto, es el elemento con mayor impacto, con un valor de 0.002065 kgCO<sub>2</sub> eq/kWh. Esto se asemeja a los resultados de Aalbers (2015), donde la estructura es el elemento de mayor contribución en la categoría de cambio climático, sin embargo, difiere en cuanto a los intercambiadores de calor y las tuberías, pues mientras su trabajo menciona que las tuberías tienen mayor relevancia en la categoría, en este caso los intercambiadores de calor tienen la prioridad. Esto se puede deber a que la planta propuesta por Aalbers (2015) es de 10 MW, por lo que la cantidad de intercambiadores de calor es menor, aunque las longitudes de tubería de agua de marina deben ser similares, pues la tubería de agua fría, sin importar el volumen de generación de la planta, requiere ser de aproximadamente mil metros de longitud para poder aprovechar el gradiente de temperaturas del océano. La elaboración de los intercambiadores de calor, fabricados de aluminio, se le atribuye un impacto de 0.001477 kgCO<sub>2</sub> eq/kWh. La tubería de agua fría, que es considerado otro elemento importante en esta tecnología tiene un valor de impacto de 0.000213 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh, principalmente por la elaboración del FRP; mientras que el elemento de almacenamiento y generación, donde se introdujo a las turbinas, principalmente por la producción de estas obtienen un valor de impacto de 0.00020 kgCO<sub>2</sub> eq/kWh.

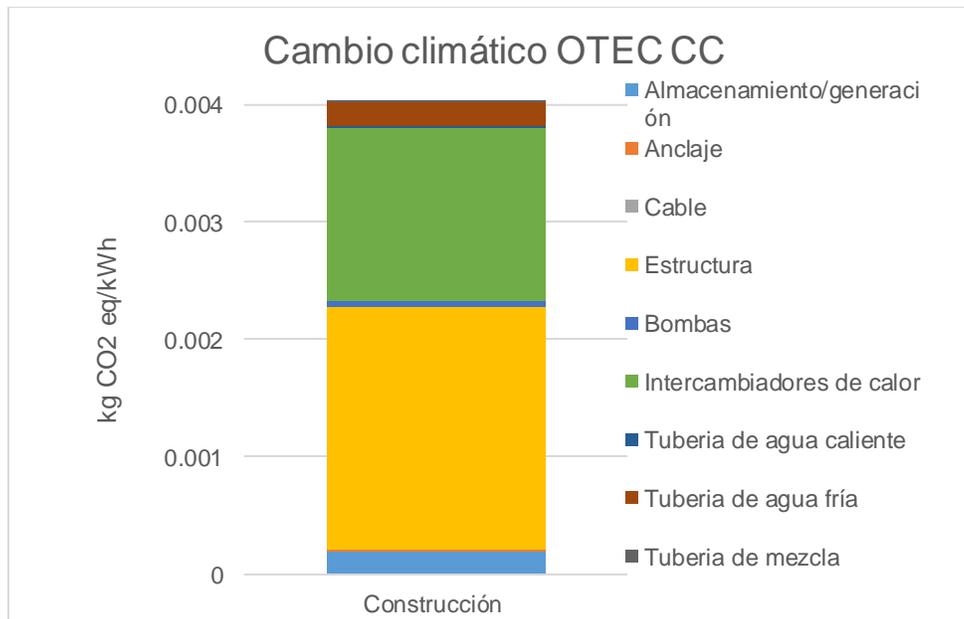


Figura 28. Valores de Impacto en la categoría de Cambio Climático para la etapa de construcción del sistema OTEC CC.

El sistema de gradiente RED, es el tercero en relevancia de impacto para esta categoría (Figura 26), su valor de impacto de 0.347 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh es un valor bastante cercano al 0.382 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh de OTEC CC y 0.411 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh del hidrogenador IMPULSA.

Este sistema presenta su mayor contribución en la etapa de construcción (Figura 29), donde las membranas son el elemento de mayor aportación, con un valor de 0.335 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh por el alto requerimiento de sustancias y que, en su producción, principalmente el estireno, tienen como resultado la emisión de CO<sub>2</sub> y metano.

Por su parte, la etapa de fin de vida tiene un total de 0.0108 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh, valor considerablemente menor, alrededor de 30 veces menor, al que presenta la etapa de construcción, donde es la disposición de las membranas las que presentan una mayor contribución a la categoría de impacto, con 0.0096 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh.

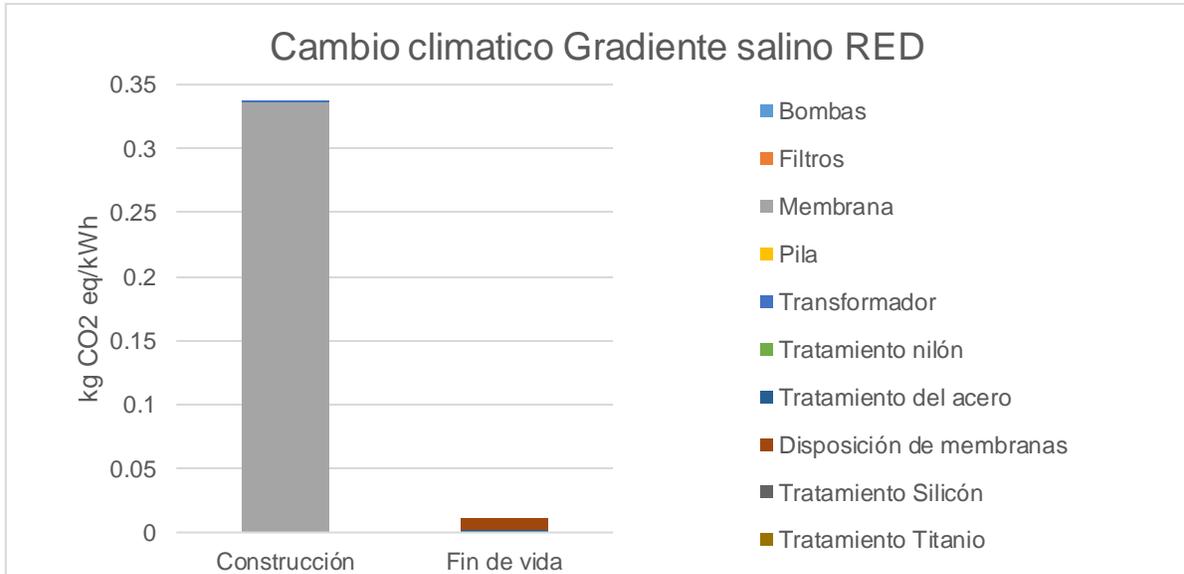


Figura 29. Valores de Impacto de la categoría de Cambio Climático para el sistema de Gradiente Salino RED.

El hidrogenador IMPULSA, que es el sistema con mayores impactos, presenta la mayor contribución a la categoría de cambio climático en la etapa de fin de vida (Figura 30), debido al tratamiento para reciclaje del acero en la fabricación de barras de acero, con un valor de 0.27 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh.

Para los dos sistemas de corriente, el Hidrogenador IMPULSA y el generador SeaGen, se propuso el mismo tipo de reciclaje para el acero, y en ambos sistemas, presenta un valor más alto que toda la etapa de construcción de los dos dispositivos. La razón por la que el impacto en el Hidrogenador IMPULSA es mayor respecto a SeaGen, se debe a que la producción de energía y el tiempo de vida del primero (500 W y 10 años) son menores a las del segundo (1.2 MW y 20 años), por lo que la relación de materiales respecto a la energía producida es mayor para el Hidrogenador IMPULSA.

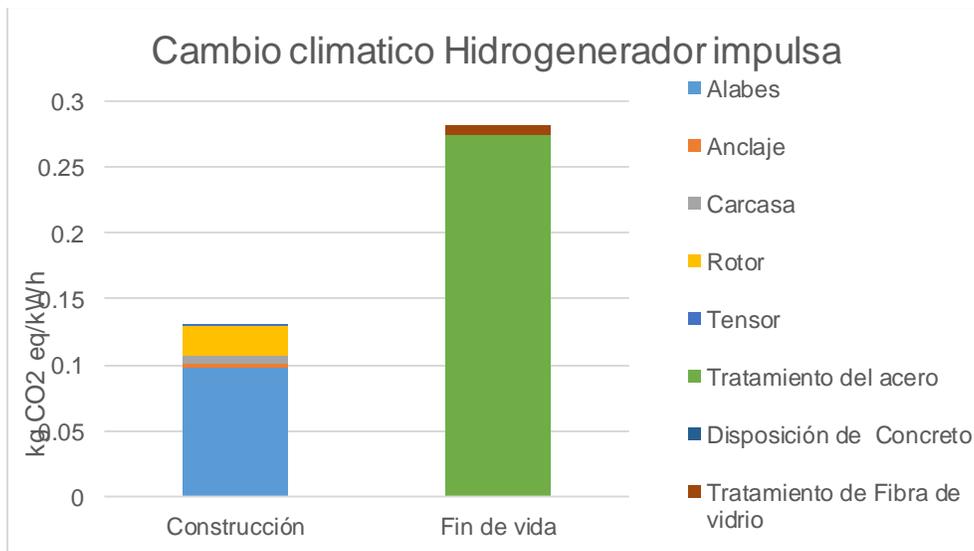
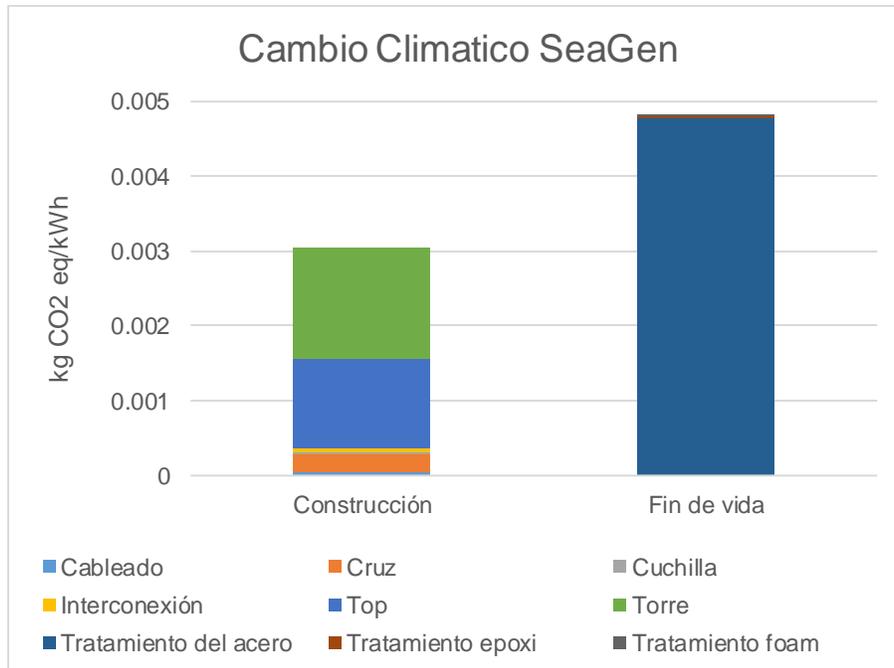


Figura 30. Valores de impacto para la categoría de Cambio Climático para el Hidrogenador IMPULSA.



**Figura 31. Valores de Impacto para la categoría de Cambio Climático para el sistema SeaGen.**

En este trabajo el generador SeaGen presenta un valor de 0.0078 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh, mientras que Douglas (2008) presenta un valor de 0.02 kgCO<sub>2</sub> eq/kWh para el mismo sistema, esta diferencia está relacionada a la cantidad de información utiliza en ambos estudios, pues este estudio se redujo a la valorización de impactos asociados a los materiales, mientras Douglas logró introducir información sobre procesos de fabricación y mantenimiento del equipo. SeaGen, presenta un valor mayor en el tratamiento del acero para reciclaje en la etapa de Fin de vida. En su etapa de construcción presenta un valor de 0.001481 para kgCO<sub>2</sub> eq /kWh asociado a la torre, el elemento que requiere mayor cantidad de materiales, seguido por la parte superior de la torre (Top) y la cruz. Estos tres elementos son los más grandes del sistema, por lo que su requerimiento de materiales es mayor.

#### 4.2.2. AGOTAMIENTO DE COMBUSTIBLES FÓSILES (ACF).

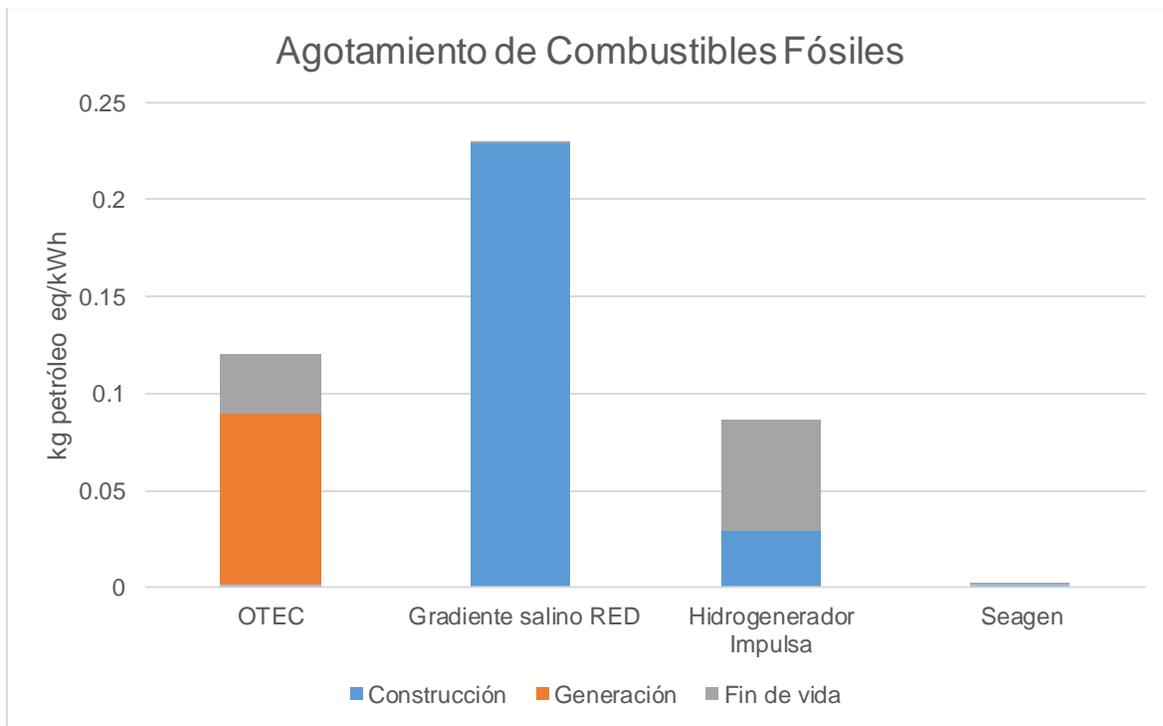
Para la categoría de Agotamiento de Combustible Fósiles, el sistema de Gradiente Salino RED requiere 0.229 kg de petróleo eq/kWh, siendo el sistema que presenta un mayor valor en esta categoría (Figura 32). Este es, además, un valor mayor que el presentado por 1 kWh producido por el Mix eléctrico de México, 0.166 kg de petróleo eq/kWh. Por otro lado, el sistema OTEC CC requiere 0.121 kg de petróleo eq/kWh y el Hidrogenerador IMPULSA requiere 0.08 kg de petróleo eq /kWh, valores menores que los del Mix mexicano eléctrico, por lo que tienen un mejor desempeño en esta categoría de impacto que la generación de electricidad convencional.

Aun así, presentan resultados más altos que otros sistemas de generación a partir del océano. Thomson (2018) presenta para un sistema WEC (sistemas de conversión de energía undimotriz, por sus siglas en inglés), un valor de 0.01 kg de petróleo eq /kWh. El sistema SeaGen presenta el valor más cercano al presentado por este último, con 0.019 kg de petróleo eq /kWh.

Zhai et al., (2018) presenta sus valores para un sistema WEC como valores normalizados porcentuales, por lo que no se pueden utilizar para la comparación. Aunque Gastelum (2017) presenta

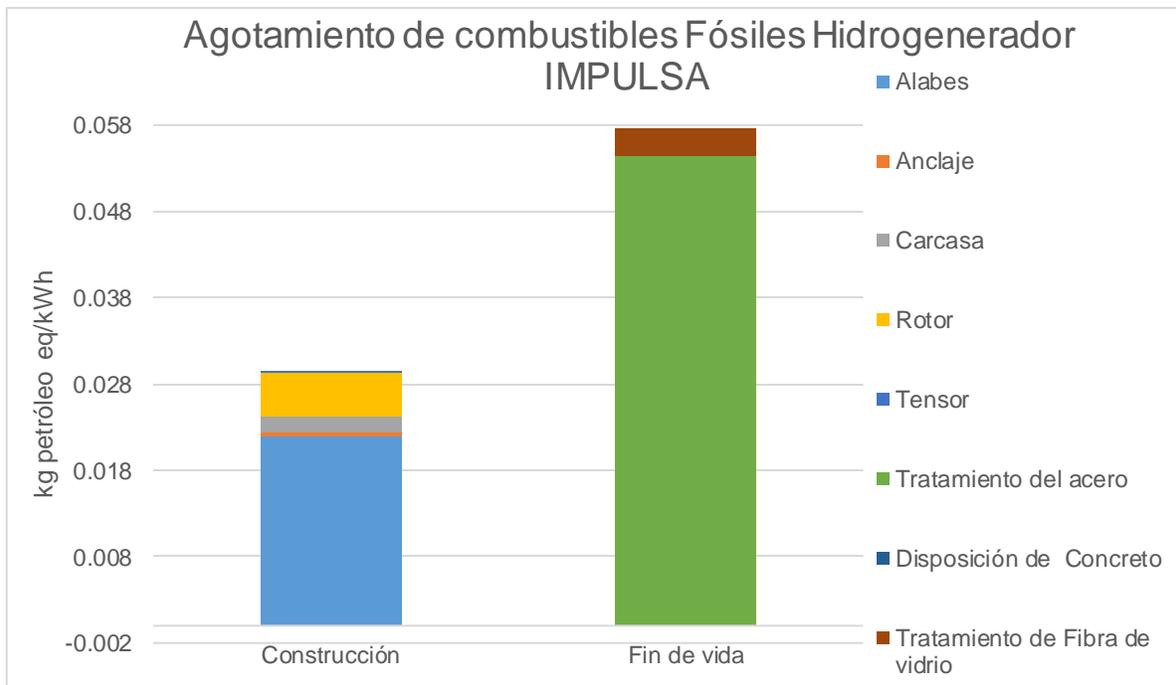
información sobre esta categoría, la unidad funcional manejada, un sistema construido, no permite la comparación. Otros artículos de ACV del océano como Parker (2007), Aalbers (2015), Uihlein (2016), y Walker et al. (2015) no presentan resultados para esta categoría de impacto.

Los valores presentados para el sistema de Gradiente Salino RED y el sistema OTEC CC, están asociados a la producción de sustancias producto de la industria química, pues en ambos casos la mayor parte del impacto son atribuidos por las membranas del sistema de Gradiente Salino, elaboradas de estireno y dibinilbenzeno, productos derivados del refinamiento del petróleo (Miller et al., 1994), presentando un valor de 0.228 kg de petróleo eq /kWh y al amoníaco, utilizado para la generación de energía en el sistema OTEC CC con un valor de 0.088 kg de petróleo eq/kWh.



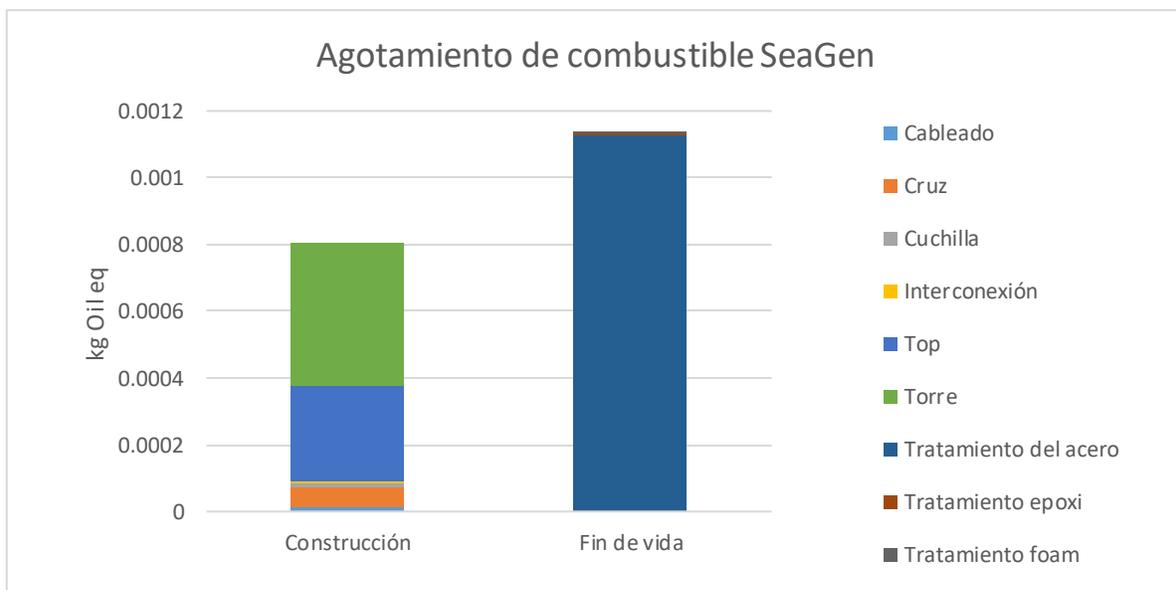
**Figura 32. Valores de Impacto para la categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles para los cuatro sistemas analizados.**

En el caso del Hidrogenerador IMPULSA, el valor de 0.08 kg de petróleo eq/kWh se debe principalmente al tratamiento de acero para reciclaje en la fabricación de barras de acero, debido a la energía utilizada. De sus elementos estructurales los álabes y el rotor, fabricados de aluminio, por la energía utilizada durante la producción (Al Hawari et al., 2014), y acero, asociado a la extracción primaria de los materiales (Mistry et al., 2016) respectivamente, son los elementos con mayor contribución a esta categoría de impacto, 0.022 kg de petróleo eq/kWh para los álabes y 0.005 kg de petróleo eq/kWh para el rotor, esto se aprecia en la Figura 33.



**Figura 33. Valores de Impacto para la categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles para el Hidrogenerador IMPULSA.**

El generador SeaGen tiene un comportamiento similar al del Hidrogenerador IMPULSA, con el valor del tratamiento del acero de 0.0011 kg de petróleo eq/kWh, asociado al consumo energético del proceso, como responsable de más de la mitad del valor de impacto total del sistema. En su etapa de construcción, la torre y la parte superior de la torre (Top) son las que presentan una mayor contribución (Figura 34), también asociadas a la utilización del acero.



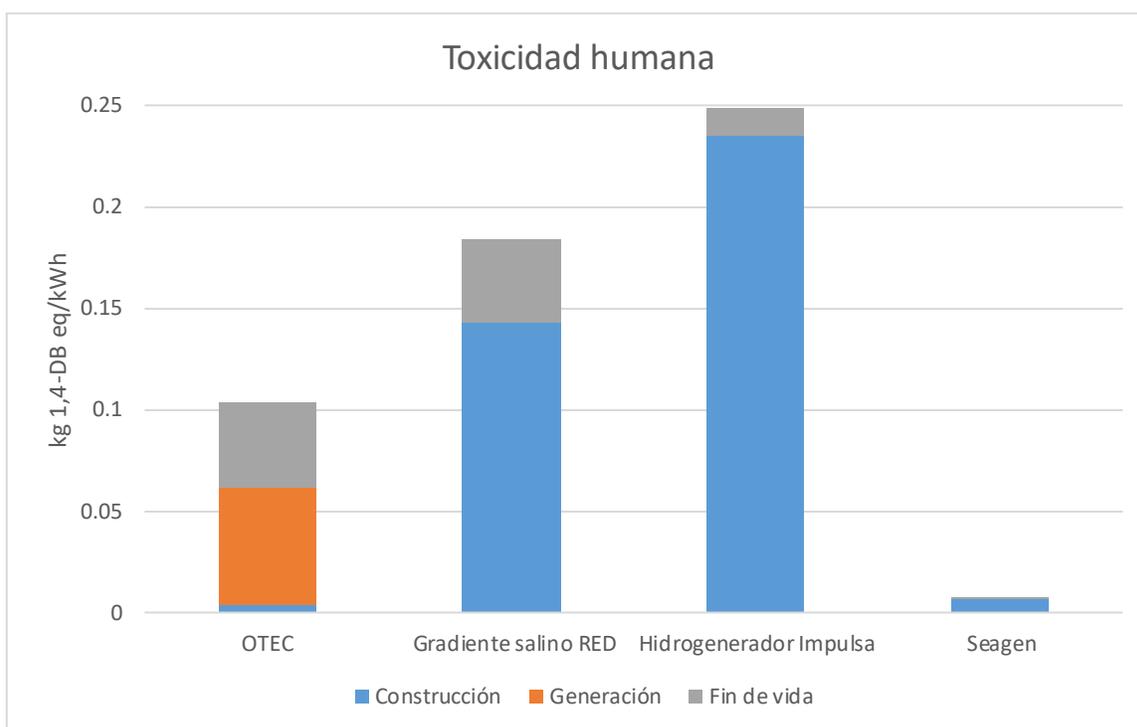
**Figura 34. Valores de Impacto para la categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles para el sistema SeaGen.**

### 4.2.3. TOXICIDAD HUMANA (TH)

El Mix eléctrico mexicano, presenta un valor de 0.408 kg 1,4-DB eq/kWh (Ecoinvent3.4). Los sistemas evaluados en este trabajo presentan valores menores a éste.

El Hidrogenerador IMPULSA presenta un valor de 0.25 kg 1,4-DB eq/kWh en la categoría de Toxicidad Humana, representando el valor más alto reportado por los sistemas analizados en este trabajo (Figura 35), donde la mayoría del impacto es aportado por la etapa de construcción.

El sistema de Gradiente salino es el siguiente, con un comportamiento semejante y un valor de 0.1839 kg 1,4-DB eq/kWh, que, en ambas etapas, construcción y fin de vida, está relacionado a las membranas, por la producción de sus compuestos (sstireno) y la disposición de éstas.



**Figura 35. Valores de Impacto para la categoría de Toxicidad Humana para los cuatro sistemas analizados.**

El sistema OTEC CC es el tercero, en el cual, el valor total es principalmente aportado por la etapa de generación (cerca del 55.77% del total del impacto de este sistema) y que se asocian a la producción del amoniaco. Mientras que el generador SeaGen presenta un valor de 0.0109 kg 1,4-DB eq/kWh, por lo que es el sistema de menor impacto asociado en esta categoría.

En la Tabla 21 se presentan valores reportados para otros sistemas del océano en otros ACV. De los sistemas analizados en este trabajo, solo el sistema SeaGen tiene un valor comparable mientras los demás presentan valores más altos. Para esta categoría, Uihlein (2016) y Zhai (2018) presentan los valores de forma porcentual, por lo que no se puede realizar un comparativo. Mientras otros ACV del océano, como Walker et al. (2015), Rule et al. (2009) y Banerjee (2013) no presentan resultados para esta categoría.

En el caso particular del sistema OTEC CC, su valor de 0.104 kg 1,4-DB eq/kWh está principalmente relacionado a la elaboración del amoniaco, que tiene asociada la descarga de sustancias como el ion

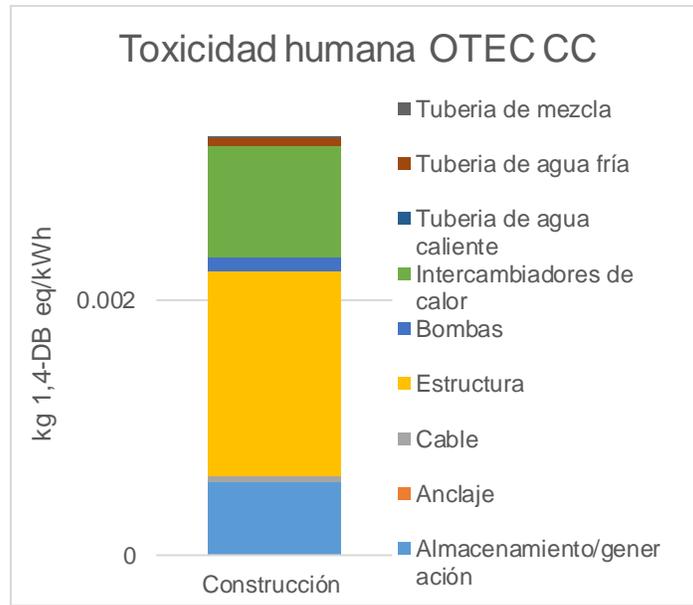
arsénico (3+), manganeso, selenio y bario, además del isótopo ZN 65, que es radiactivo; y la emisión al aire de metales pesados como arsénico, cadmio, plomo y vanadio. Aalbers (2015) presenta un valor no muy alejado de 0.0931 kg 1,4-DB eq/kWh para un sistema OTEC CC de 10 MW. La base de datos Ecoinvent 3.4, indica que la elaboración de 1 kg de amoníaco tiene asociado un impacto de 0.475 kg 1,4-DB eq, pero Bicer et al. (2016), indica que, con métodos alternos al convencional, como lo es la producción de amoníaco por electrolisis de residuos municipales, se puede reducir el valor hasta alrededor de 0.1 kg 1,4-DB eq por kg de amoníaco producido.

**Tabla 21. Valores presentados para otros sistemas de generación de energía del océano para la categoría de toxicidad humana en otras fuentes.**

Fuente	Sistema	Valor	Unidad
Douziech et al., 2016.	WEC HS1000	0.0301	kg 1,4-DB eq/kWh,
	WEC Oyster 800	0.0339	kg 1,4-DB eq/kWh,
	Hydrotidal	0.0156	kg 1,4-DB eq/kWh,
	Annapolis tidal range	0.00394	kg 1,4-DB eq/kWh,
Aalbers, 2015	OTEC 10 MW	0.0931	kg 1,4-DB eq/kWh,
Thomson, 2019	WEC	0.033	kg 1,4-DB eq/kWh,
Este trabajo	OTEC CC	0.104	kg 1,4-DB eq/kWh,
	Hidrogenador IMPULSA	0.25	kg 1,4-DB eq/kWh,
	SeaGen	0.0109	kg 1,4-DB eq/kWh,
	Gradiente salino RED	0.1839	kg 1,4-DB eq/kWh,

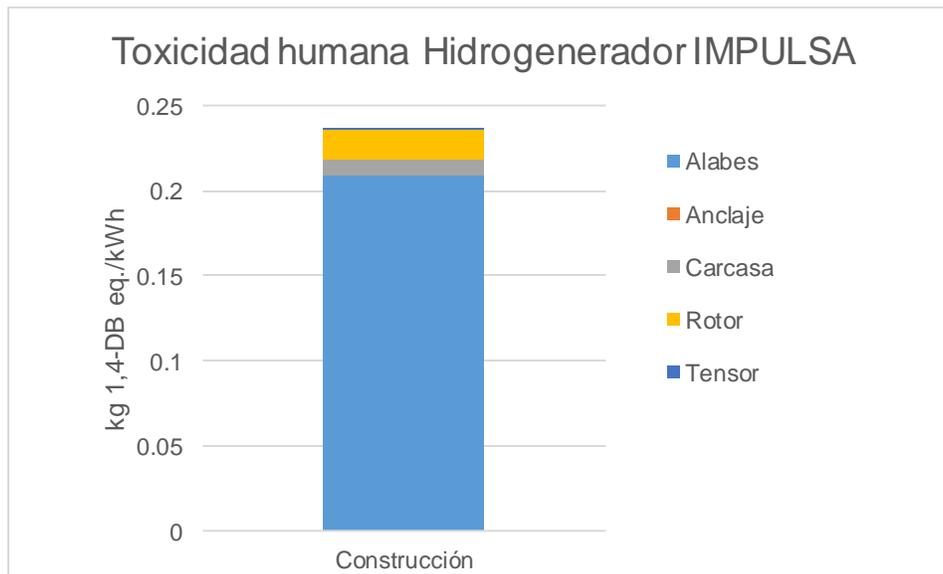
En la Figura 36 se observa que la etapa de Fin de vida del sistema OTEC CC presenta mayor impacto que la etapa de construcción, donde la mayor parte del impacto está asociada al valor del reciclaje del aluminio, 0.04 kg 1,4-DB eq/kWh, debido a la descarga del ion arsénico (3+ y 5+), magnesio, selenio y bario. Hawari et al. (2014) indica que, en la producción del aluminio, la planta de reducción tiene asociado un impacto de 123 kg de 1,4-DB eq por kg de aluminio. Mientras que en el re-uso del amoníaco, con un valor de 0.0113 kg 1,4-DB eq/kWh, que se debe al transporte de éste.

Para la etapa de construcción, que es la de menor impacto dentro del sistema OTEC CC, como se observa en la Figura 37, con una distribución similar a la categoría de cambio climático, el elemento que presenta el mayor impacto es la estructura, con un valor de 0.000159 kg 1,4-DB eq/kWh, principalmente asociado al acero y a los tanques de almacenamiento. Con un valor de 0.00087 kg 1,4-DB eq/kWh, tenemos a los intercambiadores de calor, principalmente por la descarga del ion arsénico (3+), manganeso, selenio y zinc (ZN 65) por la fabricación del aluminio. Posteriormente, el almacenamiento/generación con una contribución de 0.00056 kg 1,4-DB eq/kWh, asociado a la elaboración de las turbinas. La tubería de agua fría tiene un valor de  $6.33 \times 10^{-5}$  kg 1,4-DB eq/kWh, debido principalmente a la elaboración del FRP. Aalbers (2015), no presenta un desglose de sus elementos para esta categoría, por lo que no se puede realizar una comparación.



**Figura 36. Valores de Impacto para la categoría de Toxicidad Humana en la etapa de Construcción del sistema OTEC CC.**

Para conocer qué elemento del Hidrogenerador IMPULSA es el que presenta una mayor relevancia en esta categoría de impacto, en la Figura 36 se presentan los valores de la categoría de toxicidad humana para la etapa de construcción de dicho sistema. Los álabes, fabricadas con aluminio, son el elemento que aporta la mayor parte del valor de impacto, con 0.208 kg 1,4-DB eq/kWh, a continuación, 0.0176 kg 1,4-DB eq/kWh son aportados por los rotores, asociados a la elaboración del acero del que están fabricados.



**Figura 37. Valores de Impacto para la categoría de Toxicidad Humana del Hidrogenerador IMPULSA.**

#### 4.2.4. ECOTOXICIDAD MARINA (ETM).

Mientras que el Mix eléctrico mexicano reporta 0.0438 kg 1,4-DB eq/kWh (Ecoinvent 3.4), los sistemas de este estudio presentan valores menores. El Hidrogenerador IMPULSA presenta 0.0165kg 1,4-DB eq/kWh, seguido por el sistema de Gradiente Salino RED con 0.01638 kg 1,4-DB eq/kWh (Figura 38). OTEC CC presenta un valor de 0.0064 kg 1,4-DB eq/kWh y SeaGen un valor de 0.00087 kg 1,4-DB eq/kWh.

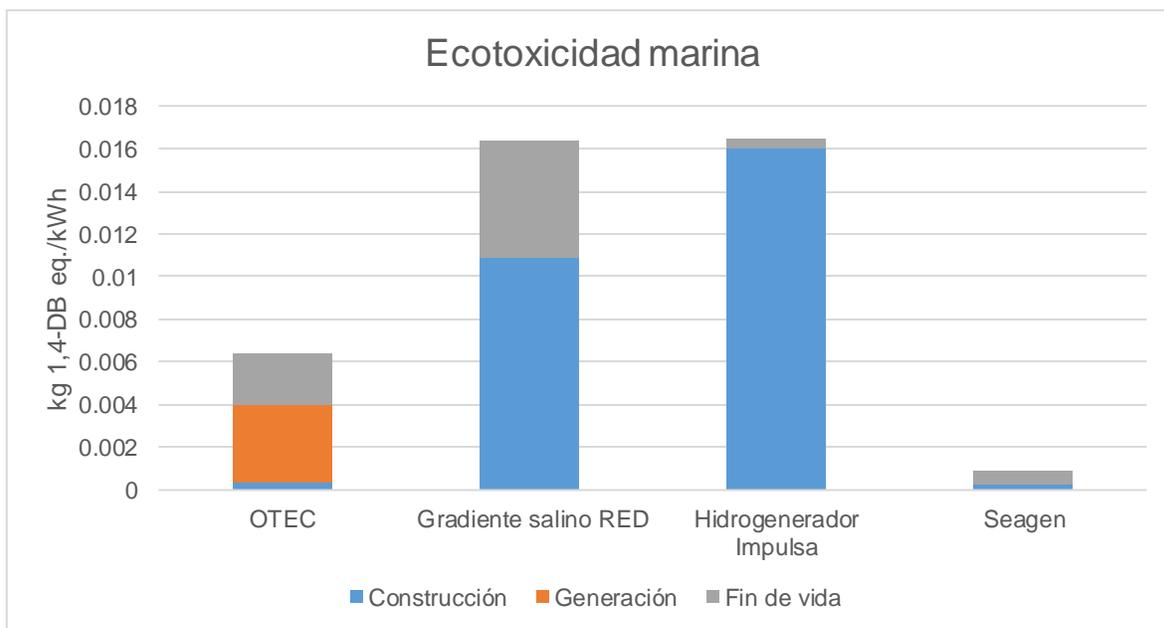


Figura 38. Valores de impacto para la categoría de Ecotoxicidad Marina.

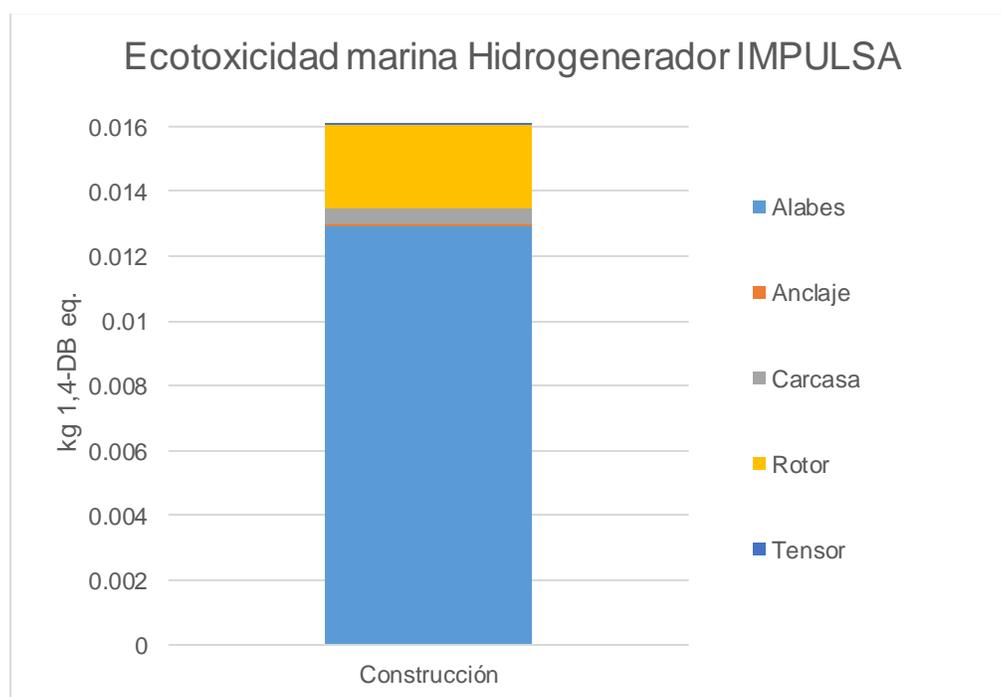
Tabla 22. Valores presentados para otros sistemas de generación de energía del océano para la categoría de ecotoxicidad marina en otras fuentes

Fuente	Sistema	Valor	Unidad
Douziech et al., 2016.	WEC HS1000	0.00112	kg 1,4-DB eq/kWh,
	WEC Oyster 800	0.000164	kg 1,4-DB eq/kWh,
	Hydrotidal	0.000985	kg 1,4-DB eq/kWh,
	Annapolis tidal range	0.000137	kg 1,4-DB eq/kWh,
Aalbers, 2015	OTEC 10 MW	48.2	kg 1,4-DB eq/kWh,
Thomson, 2019	WEC	0.000924	kg 1,4-DB eq/kWh,
Este trabajo	OTEC CC	0.0064	kg 1,4-DB eq/kWh,
	Hidrogenerador IMPULSA	0.0165	kg 1,4-DB eq/kWh,
	SeaGen	0.00087	kg 1,4-DB eq/kWh,
	Gradiente salino RED	0.01638	kg 1,4-DB eq/kWh,

En la Tabla 22 se presentan valores de otros sistemas de energías del océano en ACV publicados, se observa que los cuatro sistemas de este estudio presentan valores menores al reportado por Aalbers (2015). En comparación con los otros sistemas, solo el generador SeaGen presenta valores que pueden competir, mientras que OTEC CC, gradiente salino (RED) y el hidrogenerador presentan valores mayores.

Otros ACV como, Walker et al. (2015), Rule et al. (2009) y Banerie (2013) no presentan resultados para esta categoría, por lo que no se pueden utilizar para una comparación.

Nuevamente, el Hidrogenerador, al ser un sistema prototipo, presenta impactos considerables, colocándolo como el sistema con mayor impacto asociado, no solo de los reportados en este trabajo, sino también de otros ACV, exceptuando lo reportado por Aalbers 2015 (Tabla 20), al tener una capacidad de generación y tiempo de vida menor que el resto de los sistemas. En su etapa de construcción se encuentra la mayor parte del impacto, como se observa en la Figura 39 esto está relacionado al proceso de elaboración del aluminio, del cual están fabricadas los álabes, presentando un valor de 0.0129 kg 1,4-DB eq/kWh.



**Figura 39. Valores de Impacto para la categoría de Ecotoxicidad Marina en la etapa de Construcción del Hidrogenerador IMPULSA.**

En el caso del sistema de Gradiente Salino, el valor del impacto total está principalmente asociado, en ambas categorías a las membranas (construcción y fin de vida de las membranas), como se observa en la Figura 40. El valor aportado en la etapa de construcción por las membranas es de 0.0107 kg 1,4-DB eq/kWh, asociado principalmente a la elaboración del estireno. Mientras que, en la etapa de fin de vida, la disposición de las membranas tiene un valor de 0.0053 kg 1,4-DB eq/kWh. Cabe destacar que aun se esta trabajando en el desarrollo de membranas con una mejor eficiencia. El impacto asociado a las membranas se debe a la cantidad de membrana necesaria, si se mejora la eficiencia, la cantidad de membrana solicitada para la fabricación de los sistemas será menor.

Mientras que el dispositivo OTEC reportado por Aalbers (2015), reporta 48.2 kg 1,4-DB eq/kWh, para este estudio, la producción de amoníaco es el elemento de mayor impacto, representando el 51% del impacto del sistema OTEC CC, con un valor de 0.0033 kg 1,4-DB eq /kWh, un valor muy bajo en comparación con los reportados por Aalbers (2015). El siguiente elemento de mayor relevancia, es el tratamiento para reciclaje del aluminio, que aporta 0.002 kg 1,4-DBeq /kWh. Esto se debe a que en el proceso de reciclaje en la producción de la aleación de aluminio, se le da mayor importancia a la incorporación de aluminio primario que de aluminio reciclado.

Para la etapa de construcción, como se observa en la Figura 41, el elemento que presenta un mayor impacto es la estructura, con 0.00019 kg 1,4-DB eq /kWh, principalmente asociado al acero y a los tanques de almacenamiento. Con un valor de 0.000137 kg 1,4-DB eq /kWh, se encuentran los intercambiadores de calor, principalmente por la descarga del ion arsénico (3+), manganeso, selenio y Zinc (Zn 65) durante la producción del aluminio, que, para esta categoría tiene asociada alrededor de 72 kg 1,4-DBeq por kg de aluminio producido (Hawari et al., 2014). Posteriormente, el almacenamiento/generación, por la fabricación de las turbinas, presenta un valor de  $1.57 \times 10^{-5}$  kg 1,4-DB eq/kWh por la descarga del ion arsénico (3+), manganeso, selenio, durante la producción. La tubería de agua fría tiene un valor de  $6.65 \times 10^{-6}$ , asociada principalmente a la elaboración del FRP.

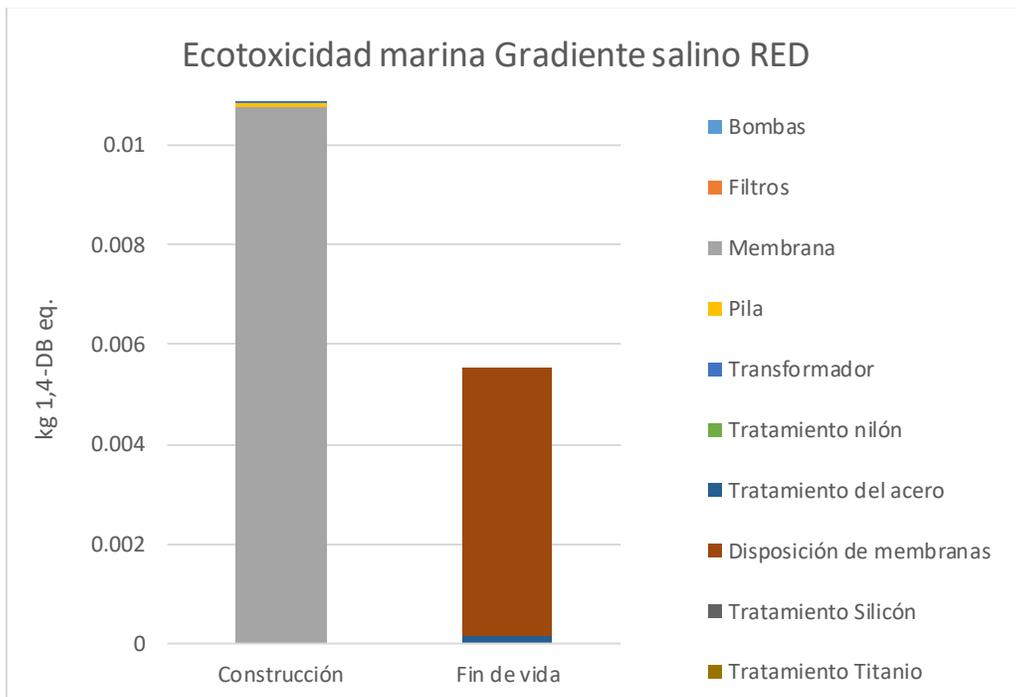


Figura 40. Valores de Impacto para el sistema de Gradiente Salino RED.

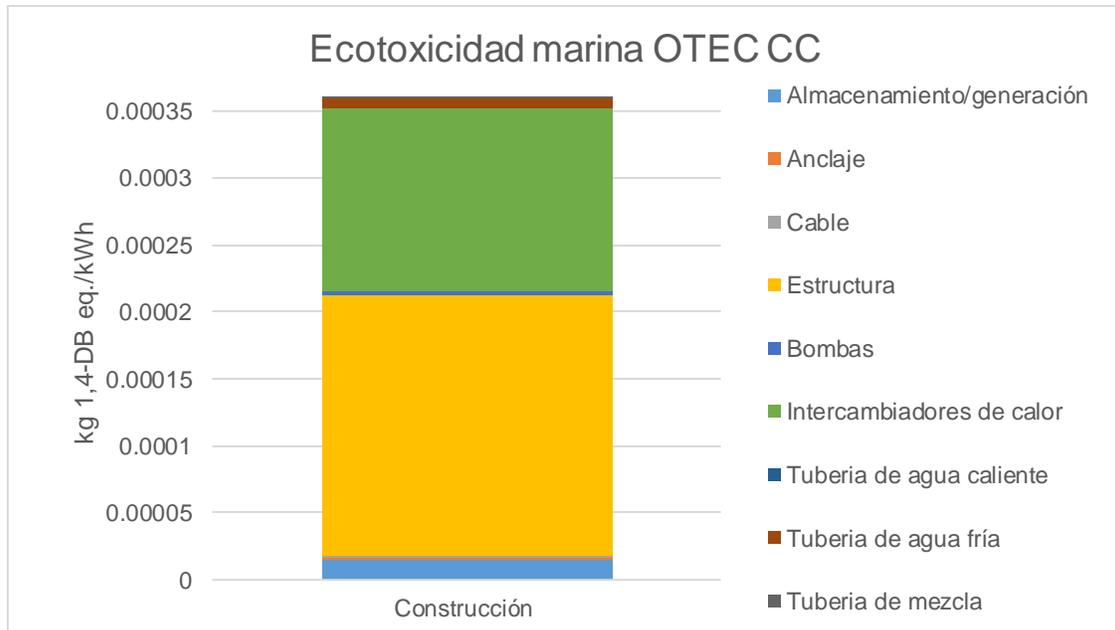


Figura 41. Valores de impacto para la categoría Ecotoxicidad marina del sistema OTEC CC en su etapa de construcción.

#### 4.2.5. EUTROFIZACIÓN MARINA (EM)

En esta categoría, el sistema de gradiente salino RED, es el que tiene asociado el mayor impacto, con un valor de 0.00081 kg N eq /kWh. El hidrogenador IMPULSA y el sistema OTEC CC se encuentran por debajo de éste con un valor de 0.000137 kg N eq/kWh y 0.0000481 kg N eq/kWh, respectivamente. El sistema SeaGen presenta un valor de 0.0000612, siendo el que menor impacto causa en esta categoría. El mix de generación eléctrica mexicano tiene asociado 0.000095 kg N eq/kWh, por lo que solamente OTEC CC y SeaGen presentan valores menores al sistema convencional de energía en México para la categoría de eutrofización marina (Figura 42).

Otros sistemas de generación de energía del océano reportados (Tabla 23) presentan valores menores a los presentados por el sistema de gradiente salino RED, al sistema OTEC CC y al hidrogenador IMPULSA. Por ejemplo, Uihlein (2018) reporta 0.00001 kg N eq/kWh para un sistema WEC atenuador y Thomson (2018) presenta un valor 0.000014 kg N eq/kWh, por lo que solo SeaGen tiene un valor comparable. Por otro lado, los sistemas reportados por Douziech et al. (2016) presentan valores incluso menores que el sistema SeaGen.

El mayor impacto obtenido en esta categoría para el sistema de gradiente salino RED corresponde a la etapa de fin de vida. En la Figura 43, se observa que la disposición de las membranas es la responsable de estos valores, presentando una contribución de 0.00076 kg N eq/kWh, debido a la descarga asociada de nitrógeno, nitratos el ion amoniacado (3+), asociados al tratamiento de materiales poliméricos para su disposición. Finalmente, los elementos restantes suman  $6.12 \times 10^{-7}$  kg N eq/kWh.

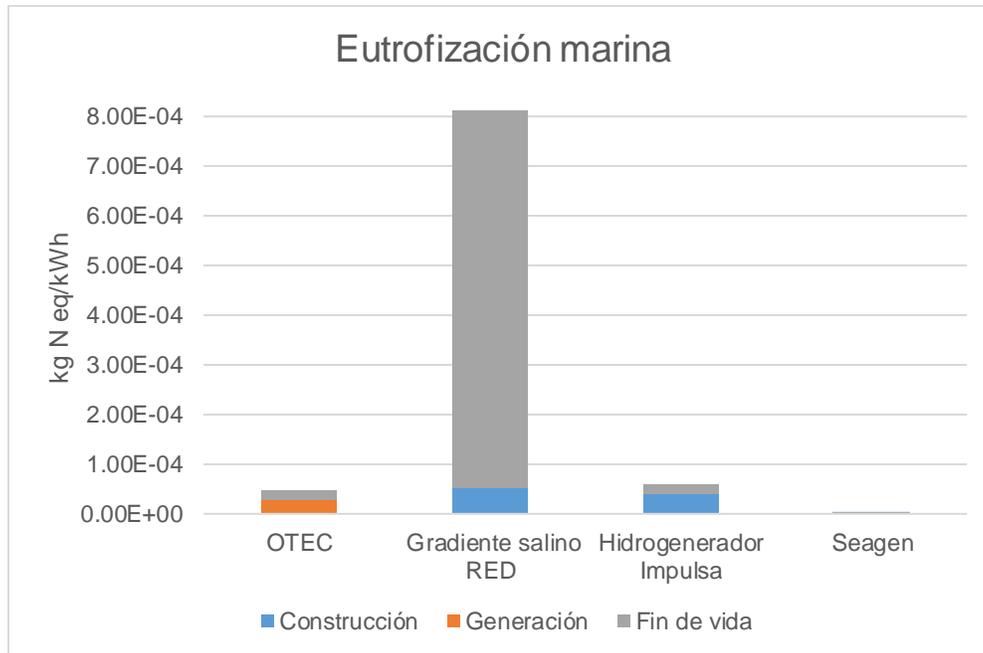


Figura 42. Valores de impacto para la categoría de Eutrofización Marina para los cuatro sistemas evaluados en este trabajo.

Tabla 23. Valores de otros sistemas de generación de energía a partir del océano para la categoría de eutrofización marina.

Fuente	Sistema	Valor	Unidad
Douziech et al., 2016.	WEC HS1000	0.00000856	kg N eq /kWh
	WEC Oyster 800	0.0000192	kg N eq /kWh
	Hydrotidal	0.0000057	kg N eq /kWh
	Annapolis tidal range	0.000000828	kg N eq /kWh
Thomson, 2019	Wec	0.000014	kg N eq /kWh
Uihlein et al., 2016	WEC	0.00001	kg N eq /kWh
Walker, 2011	WEC	0.000021	kg N eq /kWh
Este trabajo	OTEC CC	0.000481	kg N eq /kWh
	Hidrogenerador IMPULSA	0.000137	kg N eq /kWh
	SeaGen	0.0000612	kg N eq /kWh
	Gradiente salino RED	0.0008119	kg N eq /kWh

Con una menor contribución, las etapas de construcción tienen como principal aportador la elaboración de las membranas, con  $5,17 \times 10^{-5}$  kg N eq/kWh, por la emisión de óxidos de nitrógeno y descarga de nitrógeno, nitratos y nitritos, entre otros, el resto de los elementos contribuye con  $4.9 \times 10^{-7}$  kg N eq/kWh.

Mientras tanto, para el sistema OTEC CC (Figura 44), la etapa de generación es la que presenta el mayor de los impactos, contribuyendo con 0.0000245 kg N eq/kWh, donde la producción de amoníaco tiene asociadas la descarga de nitrógeno, nitratos y amonio, principalmente. Beris et al. (2016) incluye como calidad del ecosistema a las categorías de impacto de ecotoxicidad, acidificación y eutrofización, indicando que porcentualmente se puede reducir hasta 40% el impacto de la producción del amoníaco al utilizar la electrolisis de residuos municipales. Por su parte, en la etapa de fin de vida el tratamiento para reciclaje de aluminio presenta 0.000019 kg N eq/kWh, debido a la emisión de óxidos de nitrógeno, nitrógeno y nitratos, entre otros. Aalbers (2015) no presenta evaluación de su sistema OTEC CC en esta categoría.

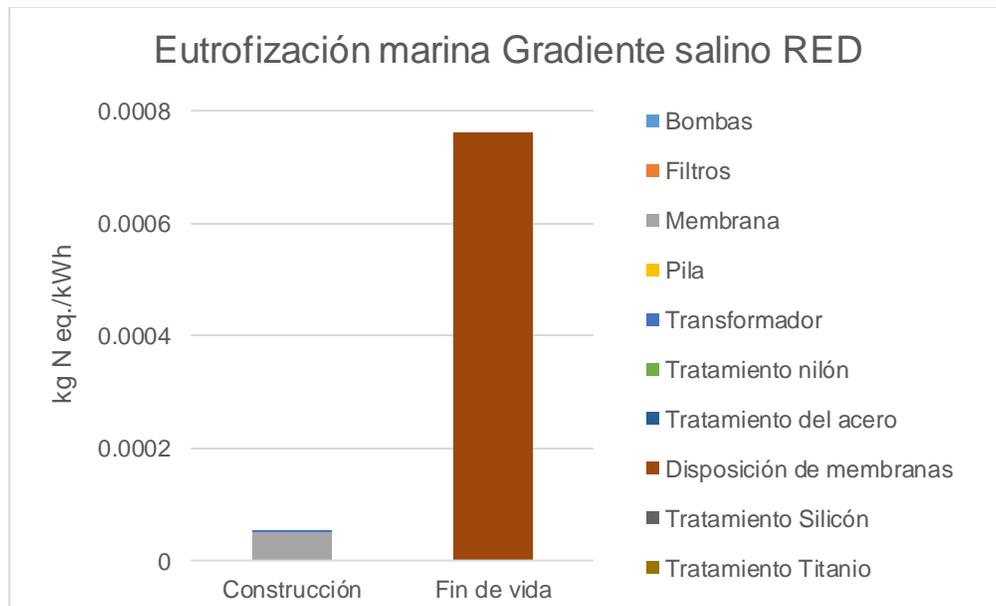


Figura 43. Valores de Impacto para la categoría de Eutrofización Marina para el sistema de Gradiente Salino RED.

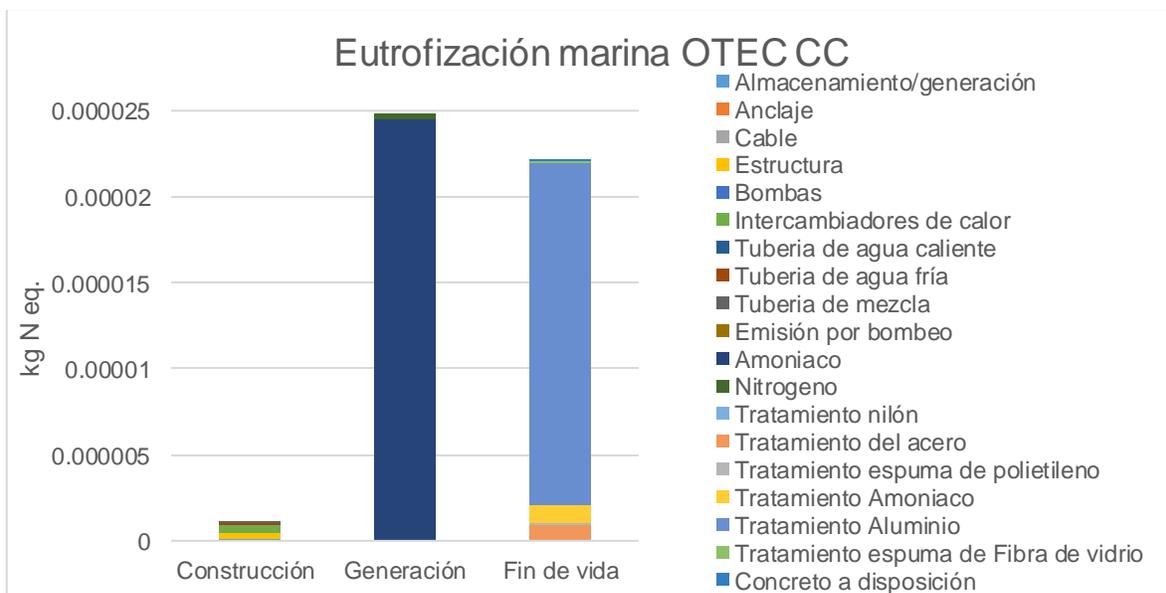
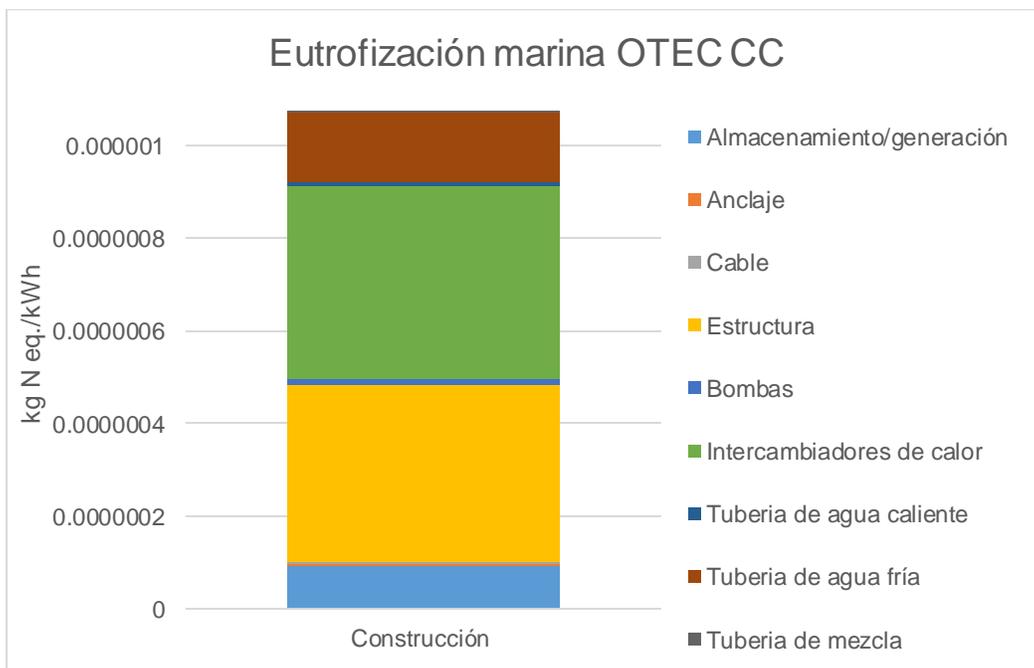


Figura 44. Valores de Impacto para la categoría de Eutrofización Marina para el sistema OTEC CC.

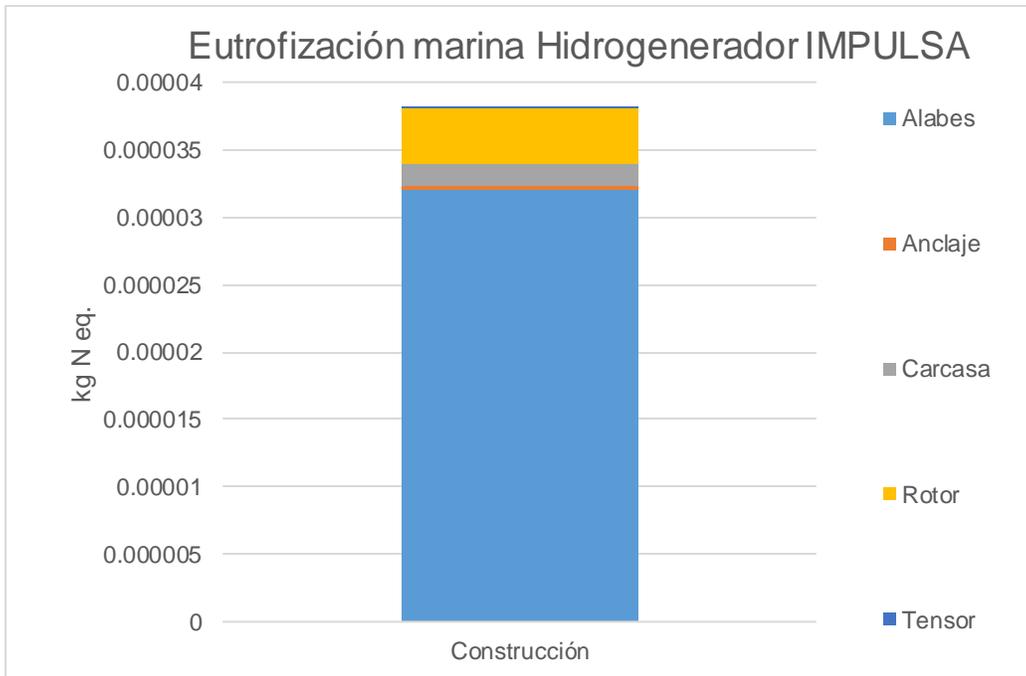
Para la etapa de construcción del sistema OTEC CC, en la Figura 45 se visualiza que, en este caso, los intercambiadores de calor presentan un impacto mayor, con valor de  $4.16 \times 10^{-7}$  kg N eq/kWh debido a la descarga de nitrógeno, nitratos, nitritos, amoníaco (3+) y la emisión de óxido de nitrógeno, entre otros. Se puede observar que, en esta categoría, tanto en la construcción, como en la etapa de Fin de vida, el aluminio es el responsable de la mayor parte del impacto, junto su participación en la construcción y en el fin de vida, los impactos asociados al aluminio son alrededor del 79 % de los impactos asociados a la producción del amoníaco.

Dentro de la construcción, después de los intercambiadores de calor, la estructura es el siguiente elemento de relevancia con un valor de  $3.81 \times 10^{-7}$  kg N eq/kWh, asociado a la producción del acero utilizado, tanques de almacenamiento y concreto. El siguiente elemento es la tubería de agua fría, que presenta un valor  $1.5 \times 10^{-7}$  kg N eq/kWh. Por su parte, en el almacenamiento, por la descarga de nitratos y emisiones de óxido de nitrógeno, entre otras, asociadas a la fabricación de las turbinas, presentando un valor de  $9.37 \times 10^{-8}$  kg N eq/kWh.



**Figura 45. Valores de Impacto para la categoría de Eutrofización Marina para la etapa de construcción del sistema OTEC CC.**

El uso del aluminio no solo afecta al sistema OTEC CC, el hidrogenador impulsa presenta un valor de  $0.0000319$  kg N eq/kWh para los alabes, representando el 83% del impacto en la etapa de construcción (Figura 46). El rotor por su parte es el siguiente elemento de importancia dentro de la construcción, pero solo representa el 11% del impacto de esta etapa.

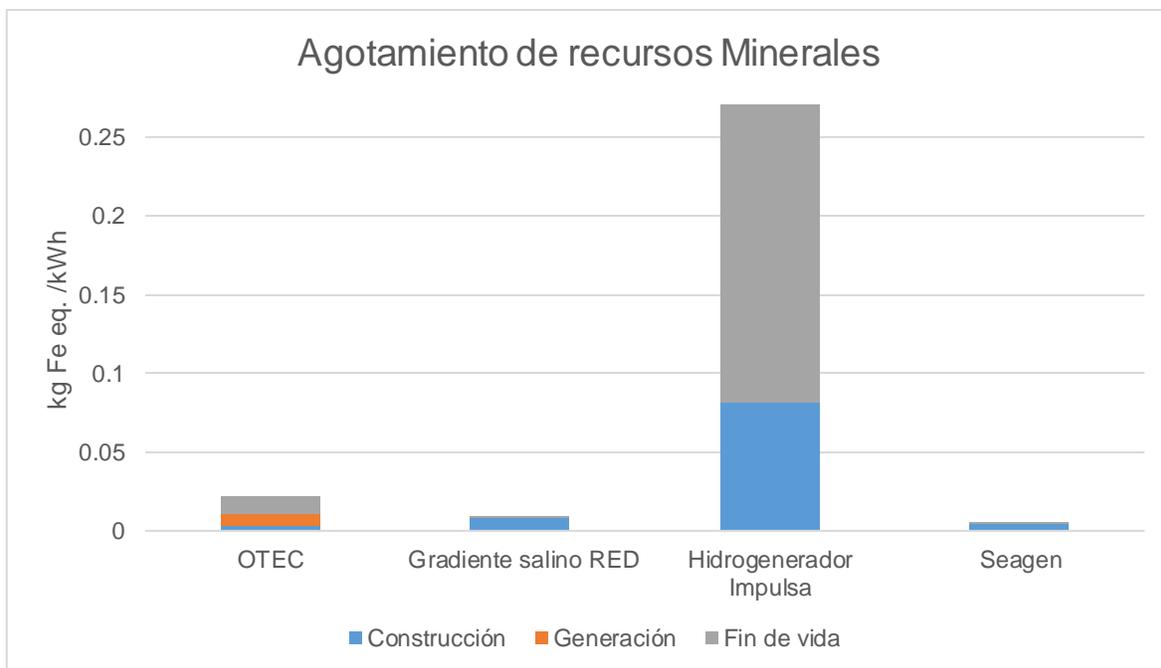


**Figura 46. Valores de Impacto para la categoría de Eutrofización Marina para el Hidrogenerador IMPULSA.**

#### 4.2.6. AGOTAMIENTO DE RECURSOS MINERALES (AM)

De los sistemas evaluados por este trabajo, el hidrogenador IMPULSA es el que presenta el mayor valor de impacto en esta categoría, como se observa en la Figura 47, con 0.277 kg Fe eq/kWh, esto es debido a que el Hidrogenerador IMPULSA es un sistema piloto que requiere alrededor de 1400 kg de metales para producir 500 W pues es una generación muy baja, relacionada a un tiempo de vida corto de 10 años, en comparación a la cantidad de material que requiere. Un sistema WEC con un requerimiento de alrededor de mil toneladas de metal, tiene asociada una generación que puede ir de 30 a 50 GW (Thomson, 2019). Mientras que el valor reportado por Douziech et al. (2016) requiere alrededor de 1000 ton de metal para una generación de 800 kW con un periodo de vida de 25 años. El segundo lugar lo ocupa el sistema OTEC CC, que presenta un valor de 0.0215 kg Fe eq/kWh. El sistema de Gradiente Salino presenta un valor de 0.0078 kg Fe eq/kWh. Estos sistemas tienen un requerimiento de recursos minerales para generar 1kWh mayor que el del Mix de generación de energía eléctrica de México, (0.003 kg Fe eq/kWh). Solo el generador Seagen, con una contribución de 0.0038 kg Fe eq/kWh tiene un valor cercano.

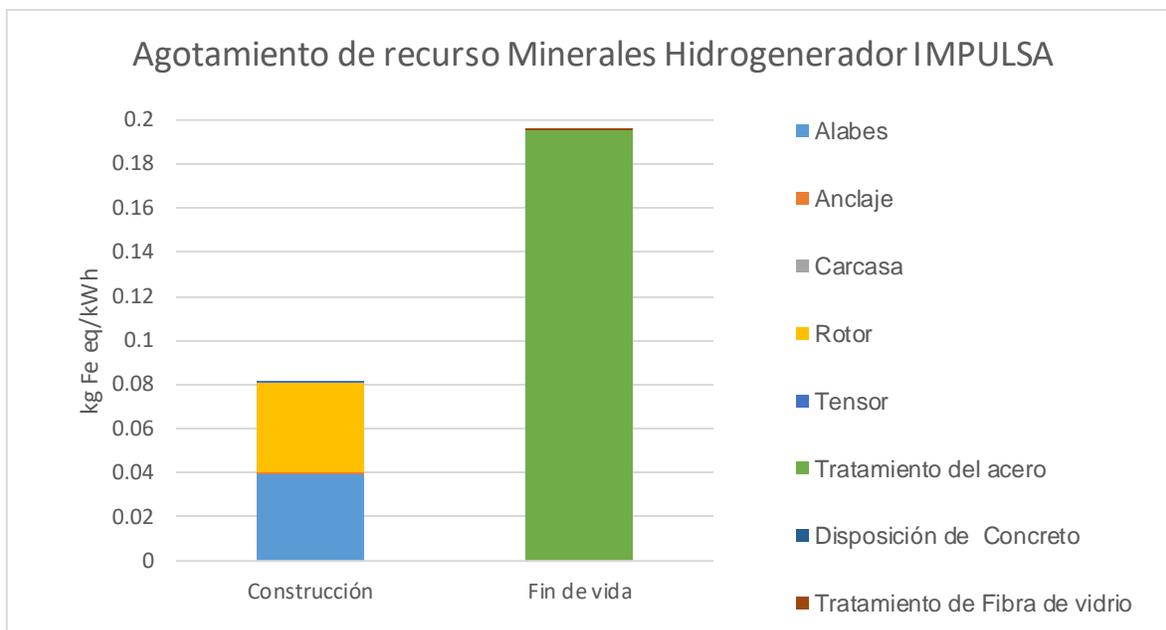
Respecto a otros sistemas del océano reportados en esta categoría (Tabla 24), el hidrogenador sigue presentando valores que pueden ser hasta 4 veces mayores (Wec Oyster). El sistema OTEC CC presenta un valor de la misma magnitud que los sistemas presentes en la Tabla 24, mientras que el sistema de gradiente salino y el sistema SeaGen presentan valores menores. Otros trabajos como Parker 2007, y Aalbeers (2015) no consideran esta categoría de impacto en la evaluación de sus sistemas.



**Figura 47. Valores de Impacto para la categoría de Agotamiento de recursos Minerales para los cuatro sistemas estudiados.**

**Tabla 24. Valores presentados por otros sistemas en la literatura para la categoría de agotamiento de recursos minerales.**

Fuente	Sistema	Valor	Unidad
Douziech et al., 2016.	WEC HS1000	0.0356	kg Fe eq/kWh
	WEC Oyster 800	0.0538	kg Fe eq/kWh
	Hydrotidal	0.0328	kg Fe eq/kWh
	Annapolis tidal range	0.0036	kg Fe eq/kWh
Thomson, 2019	WEC	0.026	kg Fe eq/kWh
Este trabajo	OTEC CC	0.0215	kg Fe eq/kWh
	Hidrogenerador IMPULSA	0.277	kg Fe eq/kWh
	SeaGen	0.0038	kg Fe eq/kWh
	Gradiente salino RED	0.0078	kg Fe eq/kWh



**Figura 48. Valor de Impacto para la categoría de Agotamiento de recursos Minerales del Hidrogenerador IMPULSA**

En la Figura 48 se observa que para el Hidrogenerador IMPULSA, el tratamiento del acero de los rotores presenta un valor de 0.1956 kg Fe eq/ kWh que representa el 99% del impacto total que se presenta en la etapa de fin de vida y el 70% del total del impacto del sistema. Aun sin considerar el impacto de fin de vida, los impactos producidos por la etapa de construcción siguen siendo mayores que los impactos asociados a los sistemas en la Tabla 24, pues la etapa de construcción presenta 0.08 kg Fe eq/kWh. Los rotores y los álabes son los elementos que presentan un valor de impacto mayor en la etapa de construcción del Hidrogenerador, 0.04 kg Fe eq /kWh y 0.039kg Fe eq/ kWh, respectivamente, debido a que están hechos completamente de materiales metálicos.

Por su parte, el sistema OTEC CC, presenta su mayor requerimiento en la etapa de fin de vida (Figura 50), debido a que el tratamiento del aluminio emplea metales como hierro, manganeso y cobre, presentando un valor de 0.011 kg Fe eq/kWh, mientras que el tratamiento del acero tiene un valor de  $3.92 \times 10^{-5}$  kg Fe eq/kWh.

En la etapa de Generación asociada a la elaboración del amoníaco, se requiere de 0.00718 kg Fe eq/kWh para su producción, utilizando metales como el cobre, el hierro, el cromo, entre otros.

Como se observa en la Figura 48, la estructura aporta alrededor del 92% del impacto a la categoría de agotamiento de recursos minerales en la etapa de construcción, con un valor de 0.0029 kg Fe eq /kWh. Las turbinas aportan 0.000148 kg Fe eq/kWh y los intercambiadores de calor, cuyo material de construcción es el aluminio, tiene un valor de  $2.6 \times 10^{-5}$  Fe eq /kWh, estos son los elementos de mayor consumo de metales.

En la Figura 50 se observa que para el sistema de gradiente salino RED, la etapa de construcción es la de mayor relevancia. La elaboración de las membranas contribuye con 0.0055 kg Fe eq/kWh, pues la fabricación de sus elementos, principalmente el estireno, requiere de la utilización de materiales como el cobre, el hierro, el estaño, el níquel, el cromo, entre otros. Las pilas contribuyen con 0.0021 kg Fe eq/kWh, por el empleo de acero y titanio, principalmente. En la etapa de fin de vida contribuye con  $2.39 \times 10^{-5}$  kg Fe eq/kWh, donde la disposición de las membranas no tiene contribución alguna.

Aun así, el impacto total del sistema es menor que el reportado por otros sistemas de generación de energía del océano, presentes en la Tabla 24.

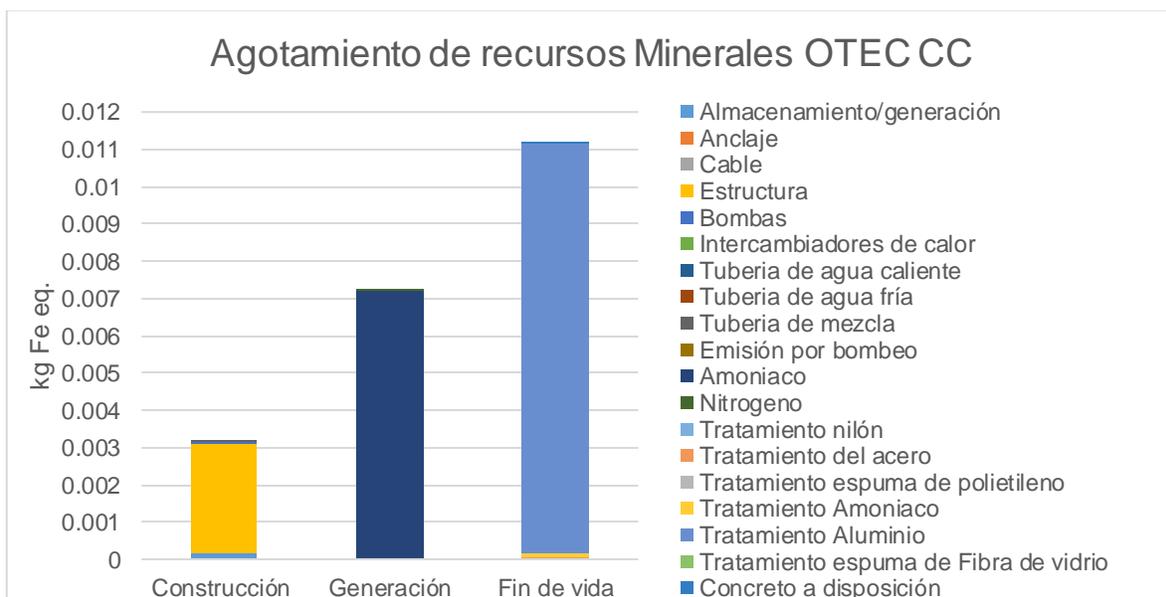


Figura 49. Valores de Impacto para la categoría de Agotamiento de recursos Minerales para el sistema OTEC CC.

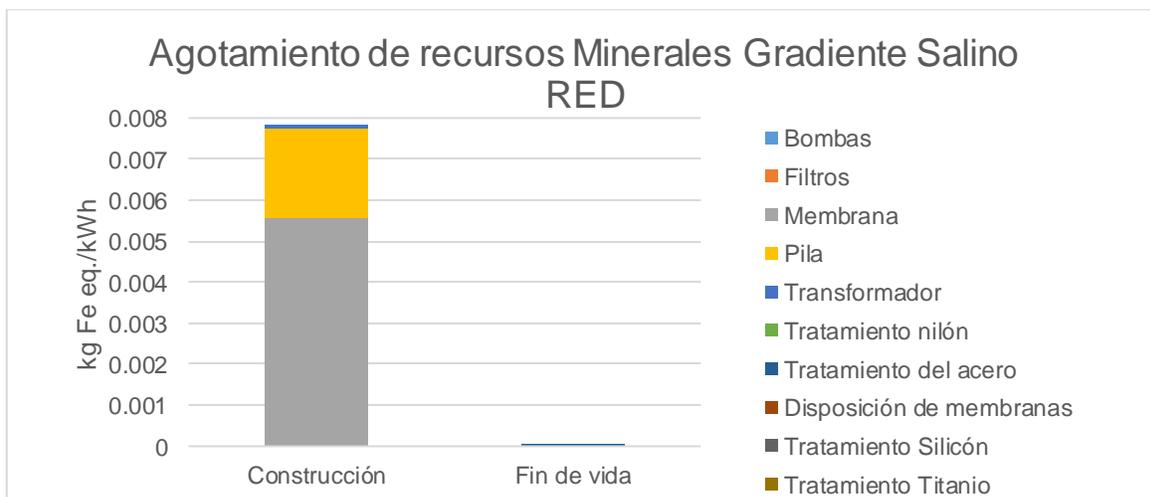


Figura 50. Valor de Impacto para la categoría de Agotamiento de recursos Minerales para el sistema de Gradiente Salino RED.

El generador SeaGen se presenta con el sistema de menor impacto en esta categoría al comparar con los sistemas de este trabajo y los presentes en la Tabla 24, exceptuando el Annapolis Tidal Range reportado por Douziech et al. (2016).

La torre, en la etapa de construcción, presenta un valor de 0.0021 kg Fe eq/kWh, representando alrededor del 57% del impacto total del sistema, Los elementos restantes de la etapa de construcción exceptuando las cuchillas, presentan un requerimiento mayor de recurso minerales que toda su etapa de Fin de Vida (Figura 51).

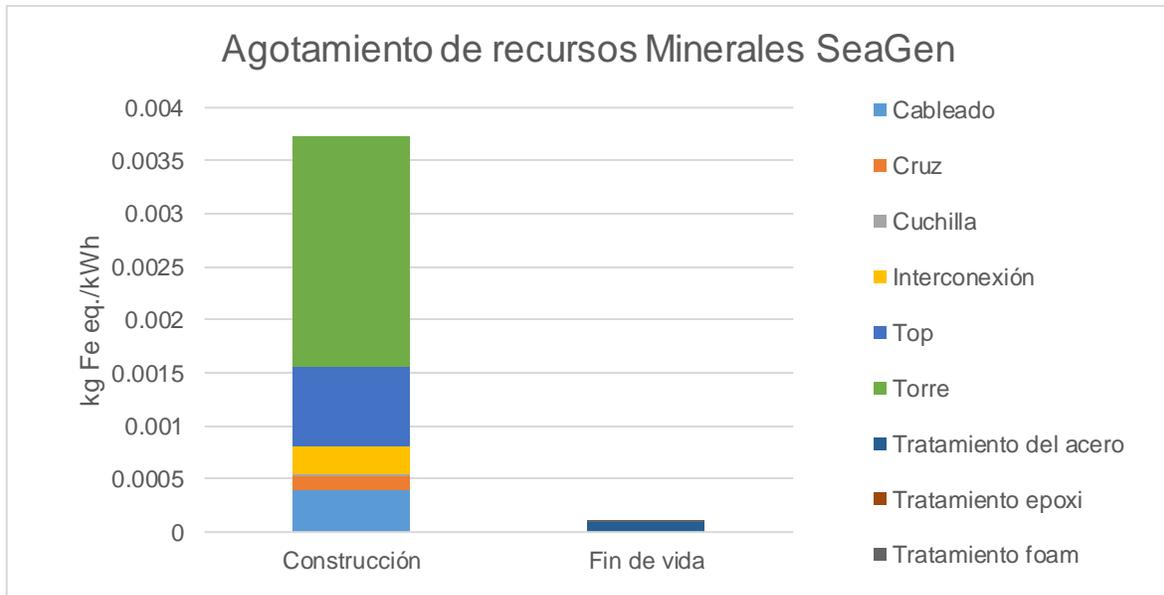


Figura 51. Valor de Impacto para la categoría de Agotamiento de recursos Minerales para el generador SeaGen.

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

El sistema evaluado en este estudio que tiene mayor impacto en la categoría de Agotamiento de la capa ozono es el sistema OTEC CC, que presenta un valor de  $3.6 \times 10^{-8}$  kg CFC-11 eq/kWh. Por otro lado, Aalbers (2015) presenta un valor menor de  $3.15 \times 10^{-9}$  kg CFC-11 eq/kWh asociado a un sistema OTEC con una capacidad de solo el 20% del sistema OTEC presentado en este trabajo. Aun así, el sistema OTEC CC de este trabajo, presenta un valor menor al del Mix eléctrico mexicano de  $4.08 \times 10^{-8}$  kg CFC-11 eq/kWh, de acuerdo a la base de datos Ecoinvent3.4, por lo tanto, los demás sistemas, de menor impacto que el sistema OTEC CC, presentes en la Figura 52, también tienen asociado un valor menor al del Mix eléctrico mexicano, que representa la forma convencional de generación eléctrica en México. El sistema de gradiente salino tiene un valor de  $1.644 \times 10^{-8}$  kg CFC-11 eq/kWh, mientras que para el hidrogenerador IMPULSA es de  $7.46 \times 10^{-9}$  kg CFC-11 eq/kWh. Por último, el menor impacto se asocia al sistema SeaGen con  $4.19 \times 10^{-10}$  kg CFC-11 eq/kWh.

Por otro lado, al compararlos con otros sistemas de generación a partir del océano, presentes en la Tabla 25, los dispositivos de gradiente salino RED, OTEC CC y el hidrogenerador IMPULSA presentan valores más altos que la mayoría de los sistemas, exceptuando los mostrados por Uihlein et al. (2016). Solamente el sistema SeaGen, que presenta  $4.19 \times 10^{-10}$  kg CFC-11 eq/kWh, tiene un valor comparable al de los sistemas presentados por Douziech et al (2016), Aalbers (2015), y Thomson (2019).

Como se presenta en la Figura 53, con un valor de  $3.19 \times 10^{-8}$  kg de CFC-11 eq/kWh, el amoníaco es el elemento de mayor impacto en la categoría de agotamiento de ozono para el sistema OTEC CC, pues su producción presenta emisiones de sustancias orgánicas halogenadas como el Halón (1211 y 1301) y el criofluorano, por mencionar los más relevantes.

En la etapa de fin de vida, el reusó del amoníaco presenta  $6.31 \times 10^{-10}$  kg de CFC-11 eq/kWh, mientras el tratamiento del aluminio presenta un valor de  $3.48 \times 10^{-9}$  kg de CFC-11 eq/kWh, en ambos casos se debe principalmente a la emisión de Halón (1301), entre otras, y son los elementos por los cuales la etapa de fin de vida tiene mayor relevancia que la etapa de construcción.

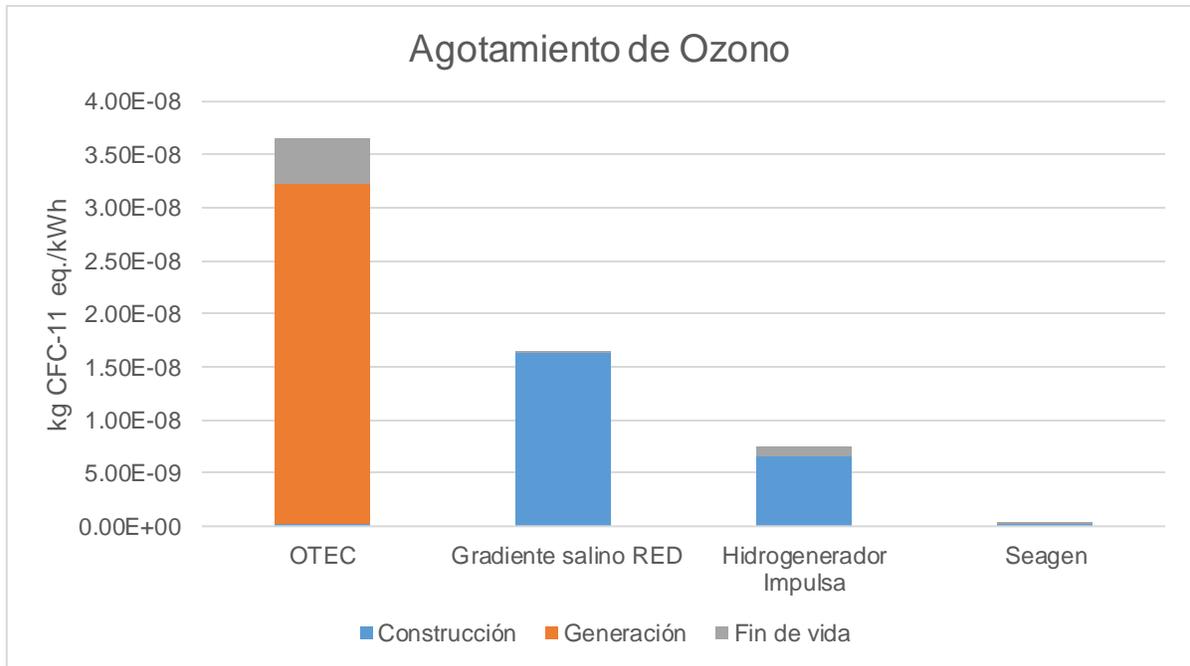


Figura 52. Categoría de Impacto de Agotamiento de Ozono para los cuatro sistemas evaluados.

Tabla 25. Valores reportados para otros sistemas de generación de energía a partir del océano para la categoría de agotamiento de ozono.

Fuente	Sistema	Valor	Unidad
Douziech et al., 2016.	WEC HS1000	3.64E-09	kg CFC-11 eq/kWh
	WEC Oyster 800	6.32E-09	kg CFC-11 eq/kWh
	Hydrotidal	2.41E-09	kg CFC-11 eq/kWh
	Annapolis tidal range	2.86E-10	kg CFC-11 eq/kWh
Aalbers, 2015	OTEC 10 MW	3.15E-09	kg CFC-11 eq/kWh
Thomson, 2019	WEC	3.70E-09	kg CFC-11 eq/kWh
Uihlein et al., 2016	WEC atenuador	0.0018	kg CFC-11 eq/kWh
	WEC por absorción puntual	0.0042	kg CFC-11 eq/kWh
Este trabajo	OTEC CC	0.000000036	kg CFC-11 eq/kWh
	Hidrogenerador IMPULSA	7.46E-09	kg CFC-11 eq/kWh
	SeaGen	4.19E-10	kg CFC-11 eq/kWh
	Gradiente salino RED	1.64E-08	kg CFC-11 eq/kWh

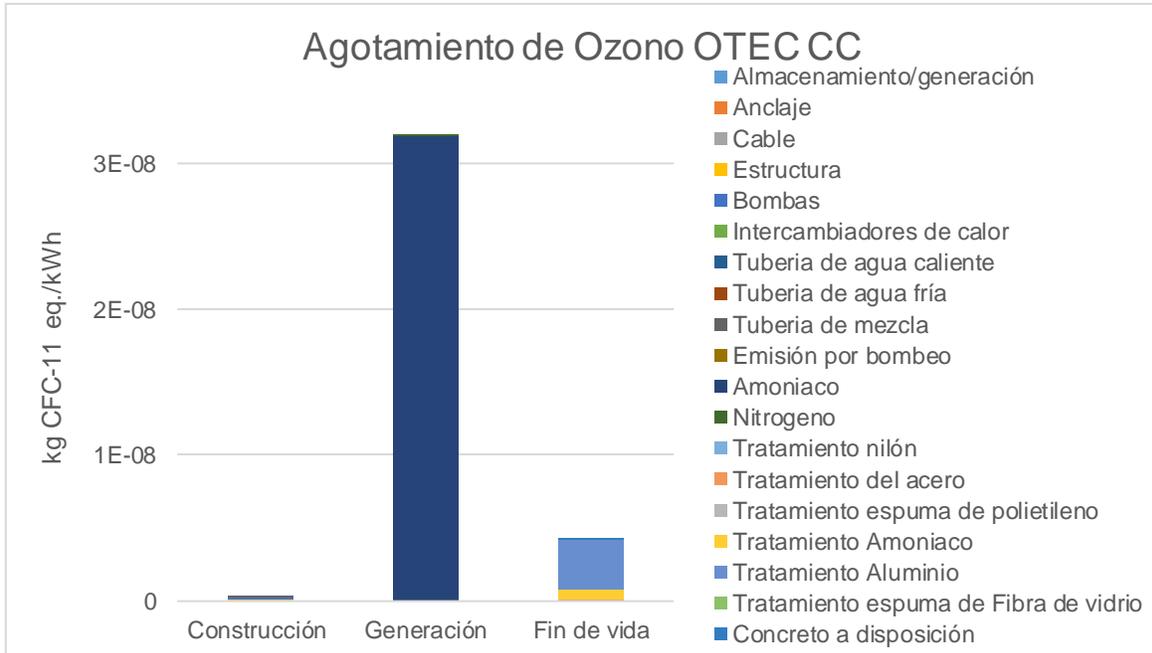


Figura 53. Categoría de Impacto de Agotamiento de Ozono para el sistema OTEC CC.

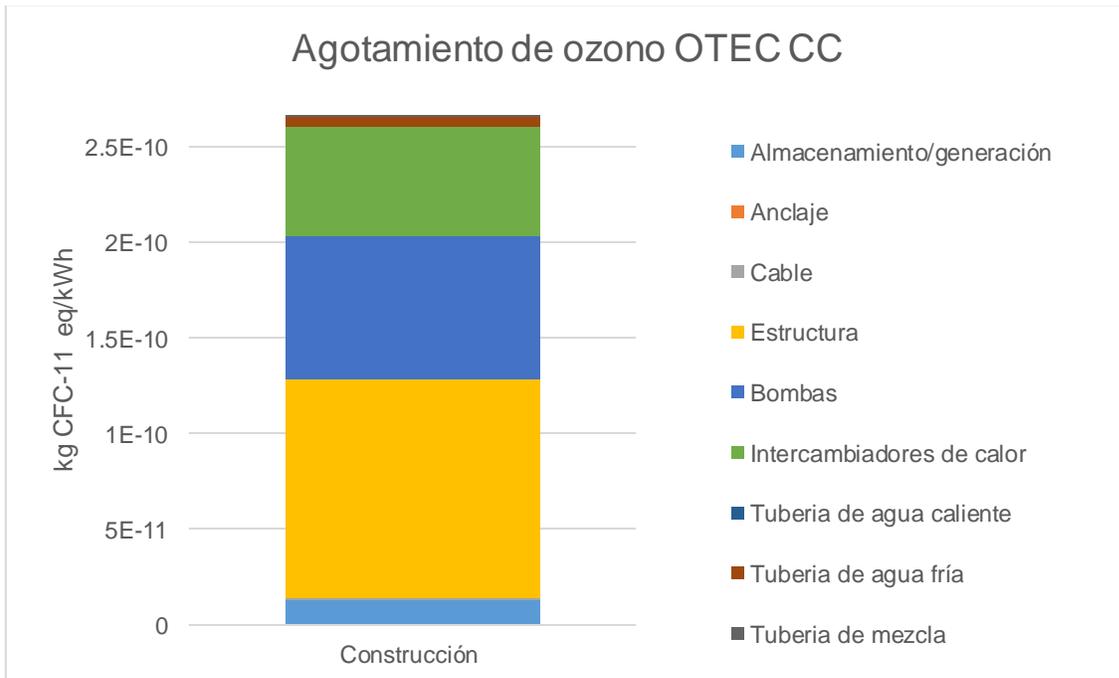


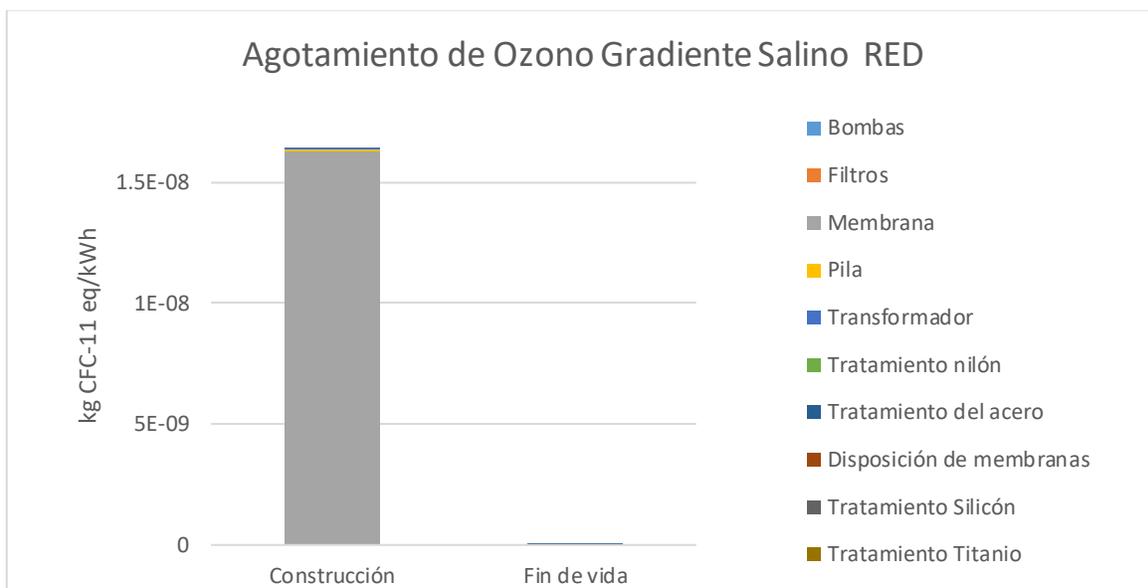
Figura 54. Categoría de Impacto de Agotamiento de Ozono para la etapa de construcción del sistema OTEC CC.

Como se observa en la Figura 54, con  $1.15 \times 10^{-10}$  kg CFC-11 eq/kWh, la estructura produce alrededor del 43% del impacto, mientras los intercambiadores de calor representan el 21.6% del impacto en la construcción, asociada al consumo de energía en la producción del aluminio utilizado en los

intercambiadores de calor, de acuerdo con Al Hawari et al. (2014), es en la planta de poder (utilizada en la producción de aluminio) donde se presenta la mayor relevancia de impacto en esta categoría.

Por su parte, las bombas un valor de  $7.41 \times 10^{-11}$  kg CFC-11 eq/kWh, representando el 27.78% del impacto en la construcción. Mientras el elemento de almacenamiento/generación presenta un valor de  $1.29 \times 10^{-11}$  kg CFC-11 eq/kWh, debido en su mayoría a las emisiones de halón en la manufactura de las turbinas. La tubería de agua fría tiene un valor de  $4.55 \times 10^{-12}$  kg CFC-11 eq/kWh, ligada principalmente a la producción de FRP.

En la categoría de impacto de agotamiento de ozono, las membranas, en la etapa de construcción, representan el 99 % del impacto total para el sistema de Gradiente Salino RED (Figura 55). Esto se debe a la emisión de clorodifluorometano (R22), entre otros, asociado a la fabricación del estireno. El restante en esta etapa suma un total de  $4.79 \times 10^{-11}$  kg CFC-11 eq/kWh, valor de la misma magnitud al total aportado por la etapa de Fin de vida,  $5.85 \times 10^{-11}$  kg CFC-11 eq/kWh.



**Figura 55. Categoría de impacto de Agotamiento de Ozono para el sistema de Gradiente Salino RED.**

En el caso del Hidrogenerador IMPULSA (Figura 56), la etapa de construcción representa el 87.7 % del impacto total, donde los alabes tienen asociado un valor de  $4.9 \times 10^{-9}$  kg CFC-11 eq/kWh, que equivale al 75.44% del impacto en la etapa de construcción, mientras que los rotores aportan  $1.03 \times 10^{-9}$  kg CFC-11 eq/kWh. Los alabes están fabricadas de aluminio, Hawari et al. (2014) reporta que el uso de la energía está asociada a un impacto de  $2.25 \times 10^{-9}$  kg CFC-11 eq/ por kg de aluminio.

Para el generador SeaGen, Douziech et al. (2016) presenta un valor de  $4.29 \times 10^{-9}$  kg CFC-11 eq/kWh, mayor al  $4.19 \times 10^{-10}$  kg CFC-11 eq/kWh mostrado en el presente trabajo, debido posiblemente a la diferencia de información utilizada respecto al transporte y otros procesos de fabricación específicos que no se integraron en esta evaluación.

En la Figura 57 se observa una mayor contribución en la etapa de fin de vida asociada al tratamiento del acero para reciclaje, con un valor de  $2.9 \times 10^{-10}$  kg CFC-11 eq/kWh, mientras que en la etapa de construcción la torre, su parte superior (Top) y la cruz son las que mayor impacto producen en esta categoría con  $1.03 \times 10^{-10}$  kg CFC-11 eq/kWh,  $6.38 \times 10^{-11}$  kg CFC-11 eq/kWh y  $1.4 \times 10^{-11}$  kg CFC-11 eq/kWh, asociado al uso de acero.

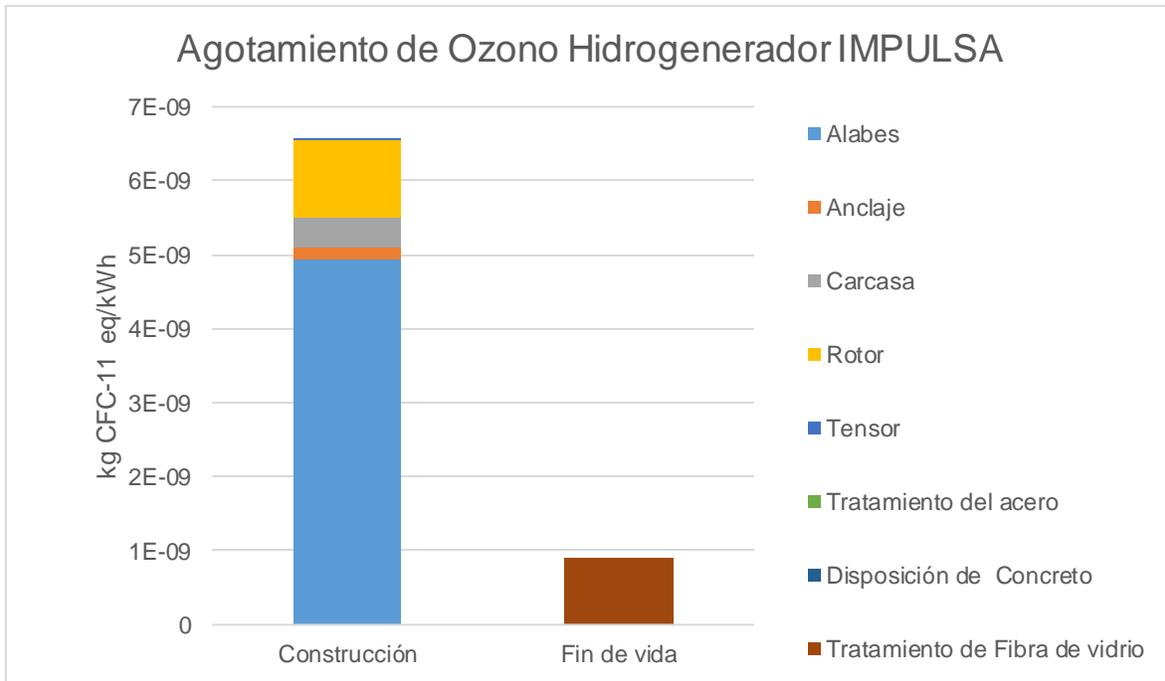


Figura 56. Categoría de Impacto de Agotamiento de Ozono para el Hidrogenerador IMPULSA.

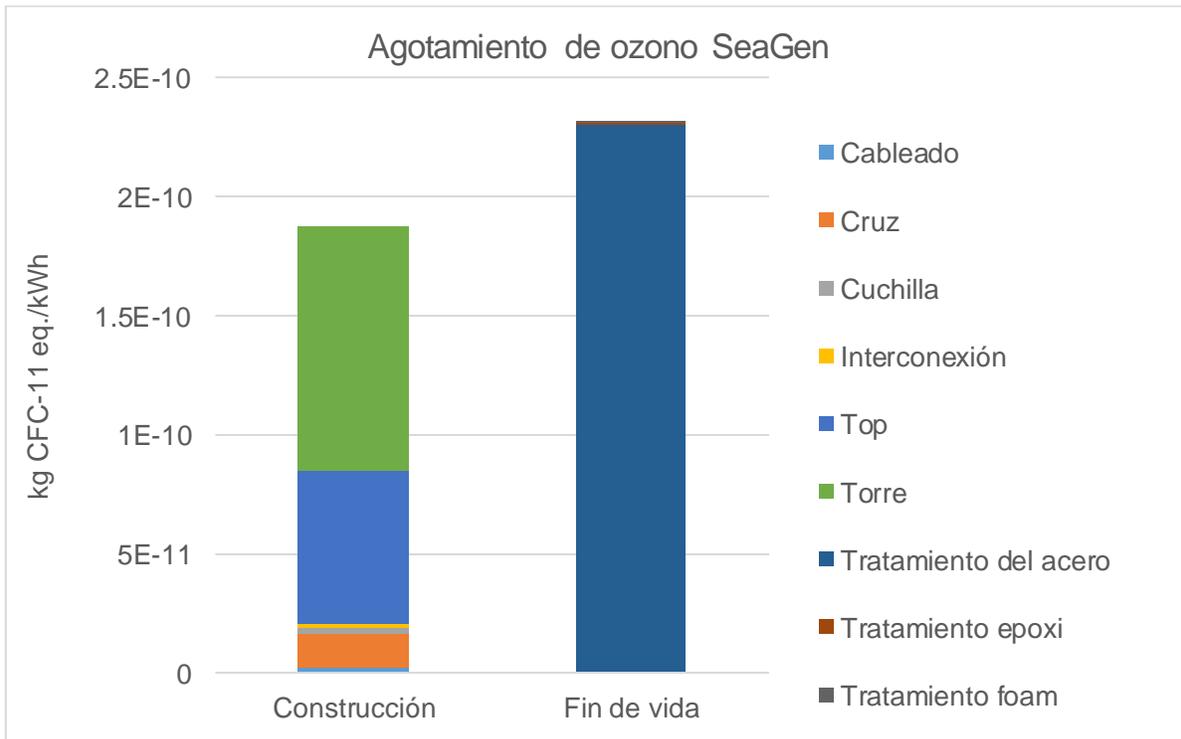


Figura 57. Categoría de Impacto de agotamiento de Ozono para el sistema SeaGen.

#### 4.2.8.FORMACIÓN DE MATERIA PARTICULADA (FMP)

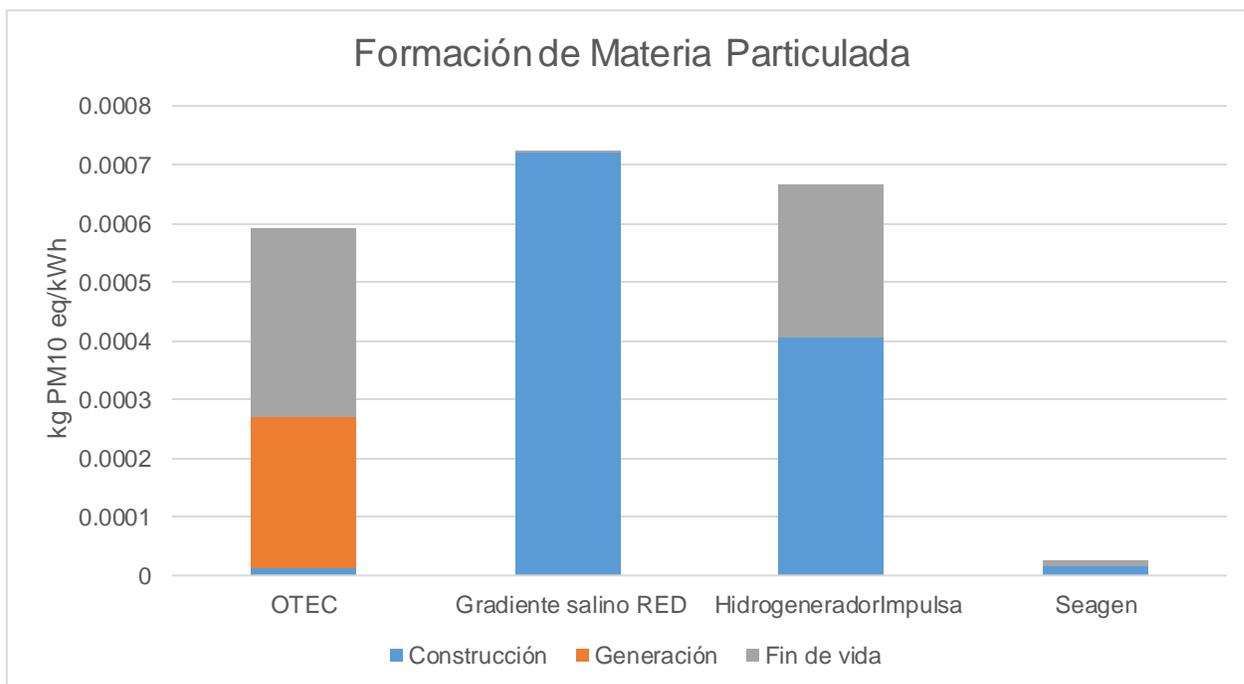


Figura 58. Valores de la categoría de impacto de Formación de Materia Particulada.

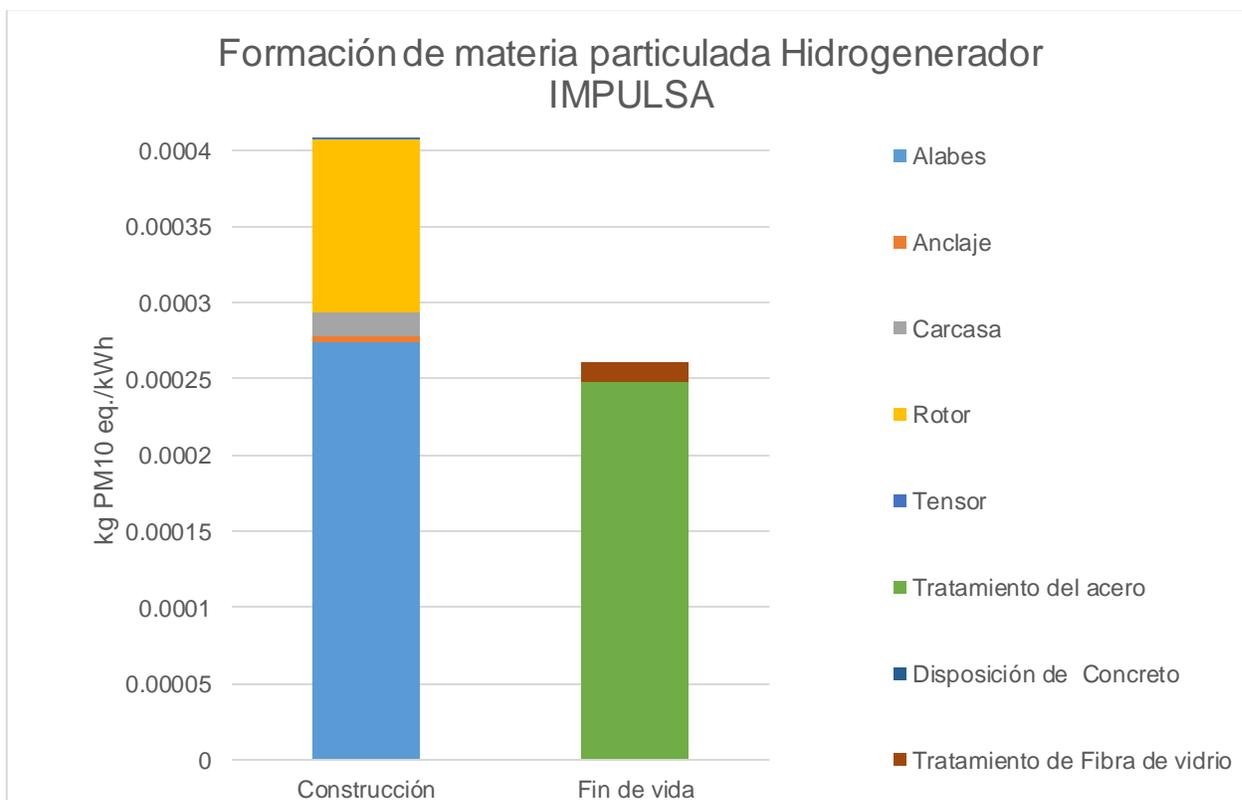
Tabla 26. Valores para otros sistemas de generación de energía del océano en la categoría de formación de materia particulada.

Fuente	Sistema	Valor	Unidad
Douziech et al., 2016.	WEC HS1000	0.0000811	kg PM10 eq /kWh
	WEC Oyster 800	0.000143	kg PM10 eq /kWh
	Hydrotidal	0.000061	kg PM10 eq /kWh
	Annapolis tidal range	0.00000885	kg PM10 eq /kWh
Thomson, 2019	Wec	0.000184	kg PM10 eq /kWh
En el presente trabajo	OTEC CC	0.00059	kg PM10 eq /kWh
	Hidrogenerador IMPULSA	0.00066	kg PM10 eq /kWh
	SeaGen	0.0000245	kg PM10 eq /kWh
	Gradiente salino RED	0.00072	kg PM10 eq /kWh

Mientras que el Mix eléctrico mexicano presenta un valor de 0.0013 kg PM10 eq/kWh, de acuerdo a la base de datos Ecoinvent3.4, los sistemas de este estudio presentan valores mucho menores. El sistema de Gradiente salino RED tiene 0.00072 kg PM10 eq/kWh, y es, de los cuatro sistemas evaluados, el que mayor impacto tiene asociado en la categoría de formación de materia particulada. La etapa de construcción presenta el 99.6% del impacto (Figura 58). La elaboración de los materiales

de las membranas es la responsable, aportando 0.0007 kg PM10 eq /kWh, pues es participé en la emisión de partículas menores a las PM10 y dióxido de azufre. La elaboración de la pila contribuye con  $1.011 \times 10^{-5}$  kg PM10 eq /kWh. La participación de la etapa de fin de vida es menor a la participación de las pilas, con un valor de  $2.72 \times 10^{-6}$  kg PM10 eq /kWh.

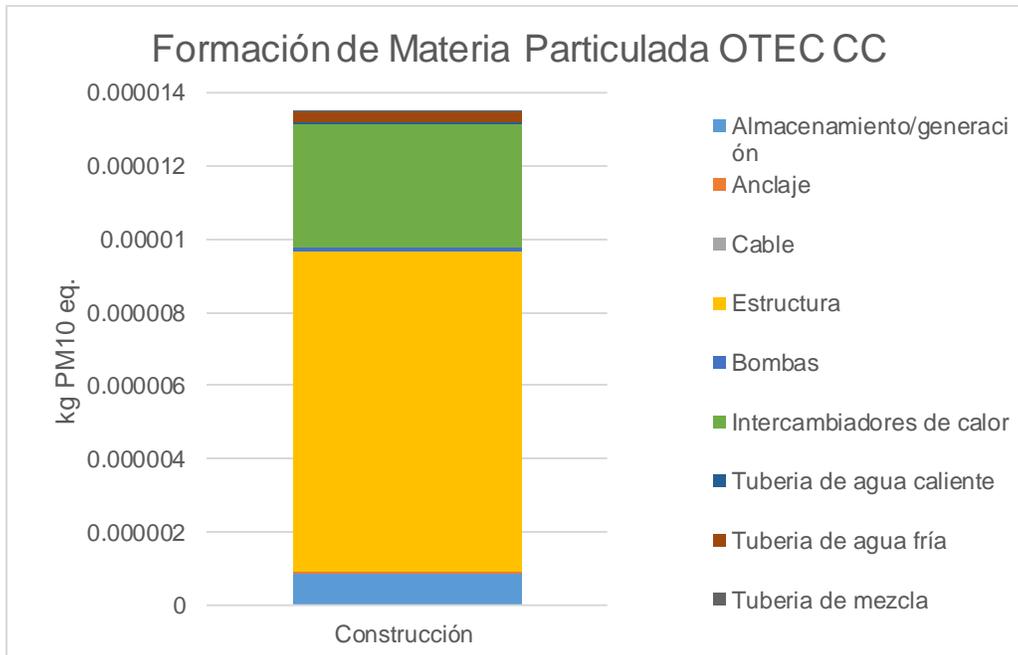
El siguiente sistema es el Hidrogenerador IMPULSA con 0.00066 kg PM10 eq/kWh y el sistema OTEC CC 0.00059 kg PM10 eq /kWh. Estos tres sistemas presentan valores mayores a los presentados por otros sistemas, presentes en la Tabla 26. El elemento mas cercano es el sistema WEC reportado por Thomson (2019), con un valor de 0.000184 kg PM10 eq /kWh.



**Figura 59. Categoría de Impacto de formación de materia particulada para el Hidrogenerador IMPULSA.**

El Hidrogenerador IMPULSA (Figura 59), tiene mayor impacto en la etapa de construcción, donde los alabes muestran un valor de 0.00027 kg PM10 eq /kWh, que representa el 76.3% del impacto en la etapa de construcción, debido a las partículas emitidas durante la fabricación del aluminio, seguidas por la fabricación del acero para los rotores, que representan el 16.6 % de la etapa de construcción.

El sistema OTEC CC, como se observa en la Figura 58, presenta un impacto mayor en la etapa de fin de vida, asociado al tratamiento de aluminio, que presenta un valor de 0.000305 kg PM10 eq /kWh, debido principalmente por la emisión de partículas menores a las PM10, óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre, cuya oxidación forma nitratos y sulfatos, componentes de la materia particulada. El mismo tipo de emisiones, son las que se asocian al reusó del amoniaco, que tienen un valor de 0.00031 kg PM10 eq /kWh. El valor que presenta el amoniaco (0.00039 kg PM10 eq/kWh) utilizado durante la etapa de generación de la energía, en la categoría de formación de materia particulada, se debe a que durante la producción del amoniaco se emiten sustancias como dióxido de sulfuro y óxidos de nitrógeno, además de partículas menores a las PM10.



**Figura 60. Categoría de Formación de Materia Particulada para el sistema OTEC CC.**

La estructura representa el 64.7% del impacto en la etapa de construcción (Figura 60), con un valor de  $8.73 \times 10^{-6}$  kg PM10 eq /kWh. Sin embargo, la producción del amoníaco representa un valor 35 veces mayor al asociado a la estructura. Las emisiones de materia particulada y de sustancias como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno durante la producción del acero y el concreto, son las responsables. Según la guía metodológica de estimación de PM2.5 (SEMARNAT, 2002), las industrias asociadas a la elaboración del cemento contribuyen en un 9% con las emisiones de materia particulada, mientras que la industria metalúrgica lo hace con un 8%. De acuerdo con Gupta et al. (2012), las cenizas volantes son la principal contribución de materia particulada en la elaboración del cemento, utilizado en el concreto. Wu et al. (2015), indican que la industria del hierro y el acero, la fabricación del acero tiene una aportación de materia particulada mayor del 30%, mientras que la etapa de síntesis, donde se incorporan las materias primas al proceso, tiene asociado los valores de emisión más alto de dos grupos de sustancias asociadas a la formación de material particulado, 72.4% de la emisión de óxidos de azufre, y 49.4% de óxidos de nitrógeno del total de proceso de producción.

El generador SeaGen es el sistema con menor impacto asociado en esta categoría. En la Figura 61 se aprecia que la etapa de construcción representa el 54.4% del impacto total del generador SeaGen. En la etapa de construcción, la torre y su parte superior contribuyen con 31.9% y 46.9% del impacto, asociado a la producción de acero, dado que es el principal material en ambos elementos.

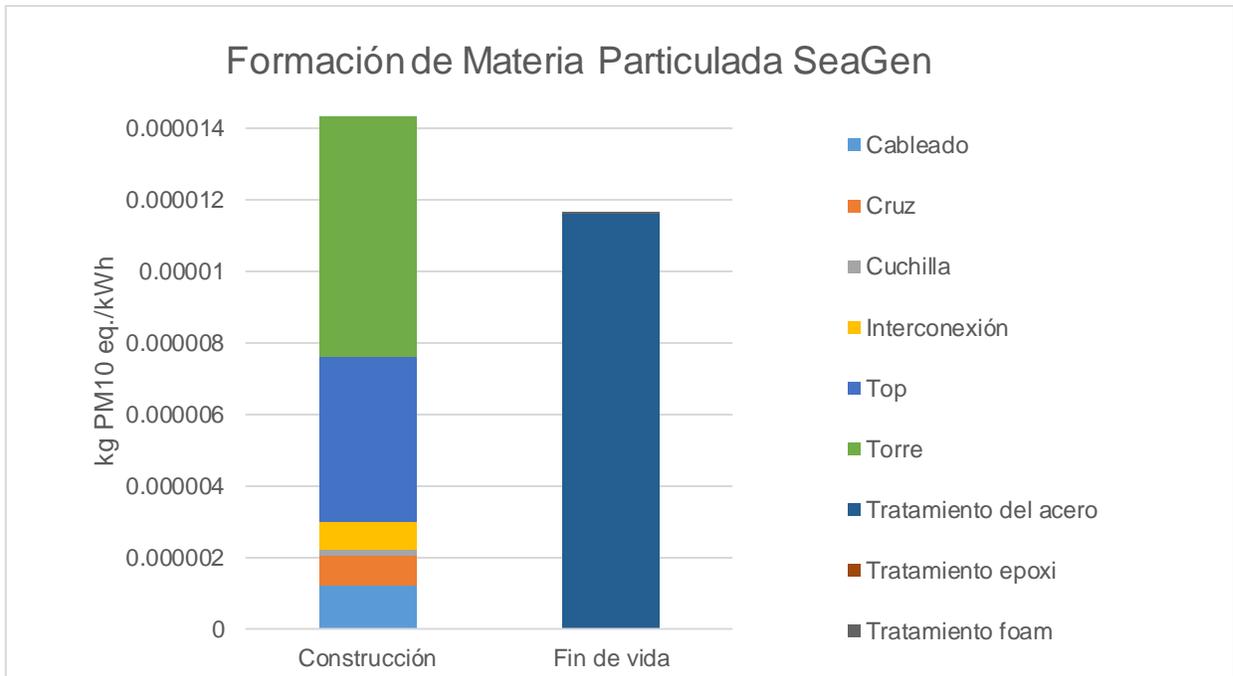


Figura 61. Categoría de Formación de Materia Particulada para el generador SeaGen.

#### 4.2.9.ACIDIFICACIÓN (A)

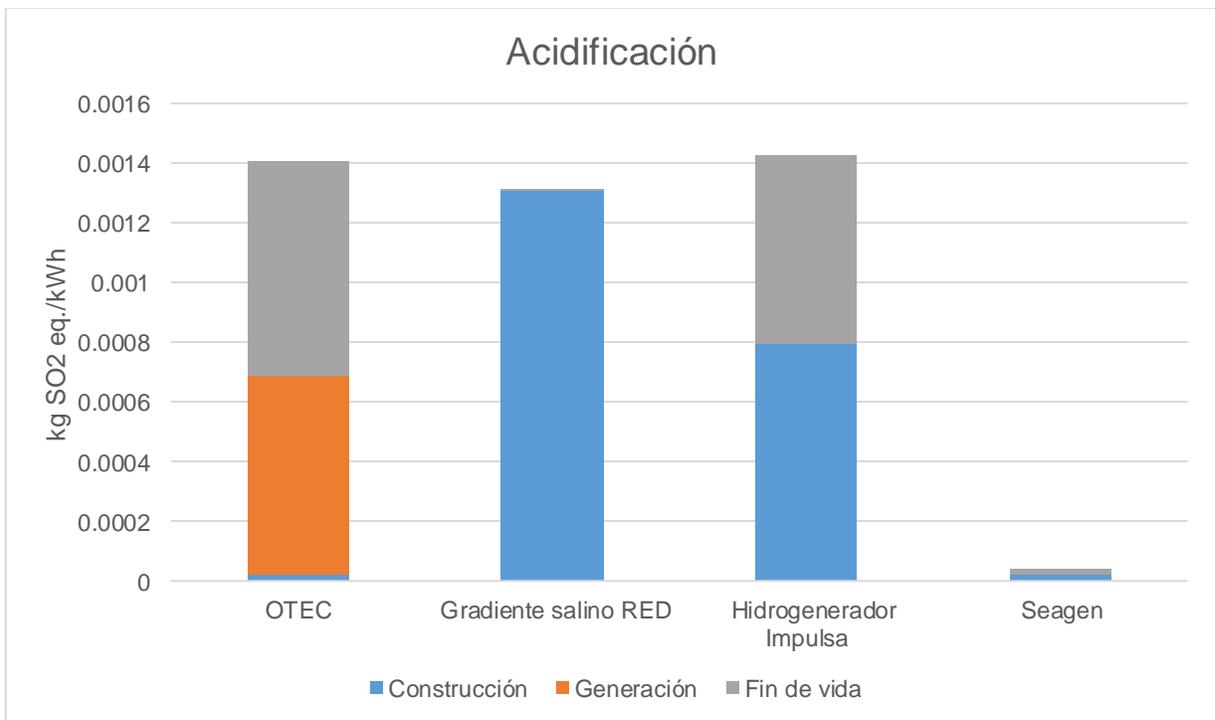


Figura 62. Categoría de Acidificación para los cuatro sistemas analizados en este trabajo.

En la categoría de acidificación, los sistemas de gradiente salino, OTEC CC y el hidrogenador IMPULSA presentan la misma magnitud de impacto (Figura 62). El hidrogenador es el que presenta el mayor valor, 0.00143 kg SO<sub>2</sub> eq/kWh, mientras que los sistemas OTEC CC y el sistema de gradiente salino presentan 0.0014 kg SO<sub>2</sub> eq/kWh y 0.0013 kg SO<sub>2</sub> eq/kWh, respectivamente. Respecto a otros sistemas de generación del océano (Tabla 27) se observa que los sistemas de evaluados presentan valores sustancialmente mayores, por ejemplo, el sistema OTEC CC, propuesto por Aalbers (2015), representa apenas el 23% del impacto del sistema OTEC CC reportado en este trabajo. Mientras que Annapolis Tidal Range (Douziech et al., 2016), que presenta el menor valor de los sistemas de la Tabla 27, equivale al 1% del impacto asociado al Hidrogenador IMPULSA el de mayor impacto en el presente estudio.

El generador SeaGen presenta un valor de 0.0000405 kg SO<sub>2</sub> eq/kWh, posicionándolo como el sistema evaluado con el menor impacto en la categoría de acidificación. Respecto a los dispositivos revisados en la Tabla 27, solo Annapolis Tidal Range, presentada por Douziech et al. (2016) tiene registrado un valor de impacto menor. Estos resultados tienen sentido, al ser el generador SeaGen un sistema comercial de gran escala, mientras que los otros sistemas aquí presentados, funcionan como adaptación de la información de casos teórico (OTEC CC), aun no cuentan con las eficiencias necesarias (gradiente salino) o simplemente no se ha considerado su diseño para una generación comercial (Hidrogenador IMPULSA) lo que tiene como resultado impactos asociados mayores.

Aun así, presentan mejores resultados que el Mix eléctrico mexicano, que representa la forma convencional de producción de electricidad y que presenta un valor de 0.0199 kg SO<sub>2</sub> eq/kWh.

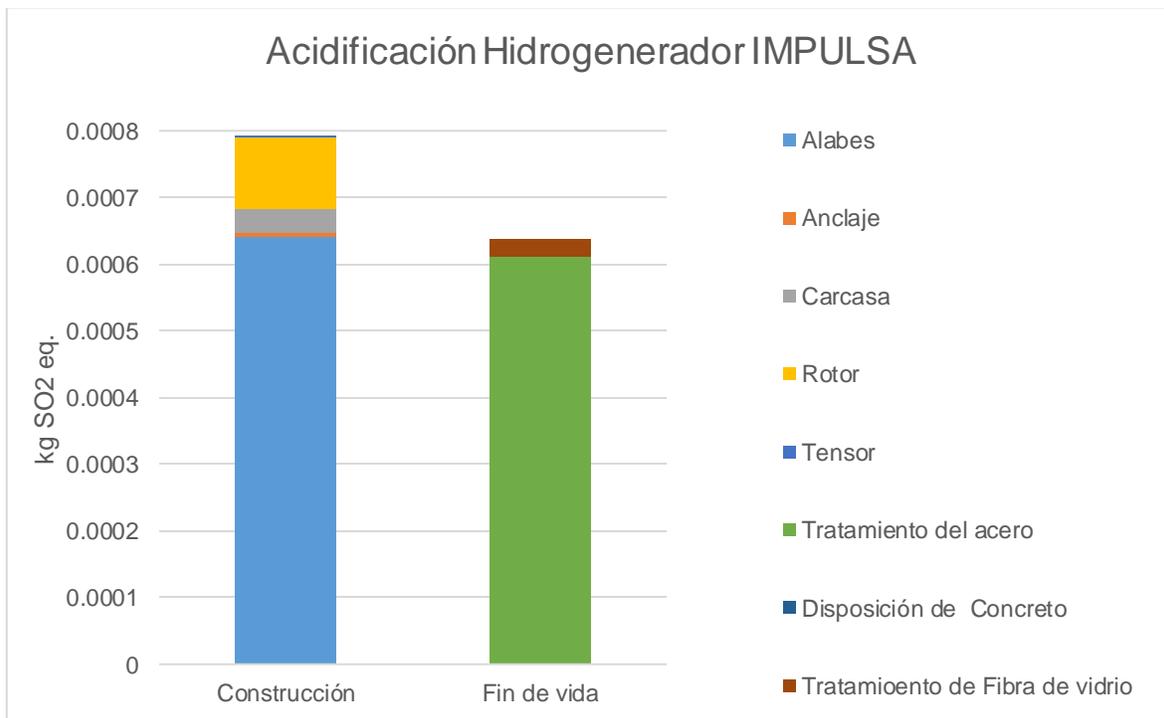
**Tabla 27. Valores para sistemas de generación de energía del océano en la literatura, para la categoría de acidificación.**

Fuente	Sistema	Valor	Unidad
Douziech et al., 2016.	WEC HS1000	0.000149	kgSO <sub>2</sub> eq/kWh
	WEC Oyster 800	0.000251	kgSO <sub>2</sub> eq/kWh
	Hydrotidal	0.0000993	kgSO <sub>2</sub> eq/kWh
	Annapolis tidal range	0.0000161	kgSO <sub>2</sub> eq/kWh
Aalbers, 2015	OTEC 10 MW	0.000327	kgSO <sub>2</sub> eq/kWh
Thomson, 2019	WEC	0.000404	kgSO <sub>2</sub> eq/kWh
Presente estudio	OTEC CC	0.0014	kgSO <sub>2</sub> eq/kWh
	Hidrogenador IMPULSA	0.00143	kgSO <sub>2</sub> eq/kWh
	SeaGen	0.0000405	kgSO <sub>2</sub> eq/kWh
	Gradiente salino RED	0.0013	kgSO <sub>2</sub> eq/kWh

El impacto para el Hidrogenador IMPULSA (Figura 63), está asociado principalmente a los álabes, que aportan 0.00064 kg SO<sub>2</sub> eq/kWh, en la etapa de construcción, y al tratamiento del acero, que tiene un valor de 0.000612 kg SO<sub>2</sub> eq/kWh, en la etapa de fin de vida. El aluminio, utilizado en las alabes, puede llegar a presentar un valor de acidificación de 0.0564 kg SO<sub>2</sub> eq por kg de aluminio producido, siendo en el proceso de electrolisis donde se presentan los mayores impactos (Aluminium Association, 2013).

El 51% del impacto en esta categoría para el sistema OTECC, corresponde a la etapa de fin de vida, donde el mayor contribuyente es el tratamiento del aluminio para su reciclaje, que contribuye con el

93% del impacto en esa etapa y se asocia a la emisión de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno durante el reciclaje de aluminio. La etapa de generación contribuye con un 47%, debido al dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno, liberados durante la producción del amoníaco.



**Figura 63. Categoría de Impacto de Acidificación para el Hidrogenerador IMPULSA.**

En la Figura 64, se presentan los impactos en la etapa de construcción del dispositivo OTEC CC. La estructura presenta el 46% del impacto, asociado a las emisiones de óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre asociadas a la elaboración del acero el concreto. Ramsey et al. (2014) reporta que el 58% del impacto asociado al concreto, se debe a la fabricación del cemento, de acuerdo con Knoeri et al. (2013) es responsable en más del 40% del impacto.

El aluminio utilizado en los intercambiadores de calor es el responsable de que este elemento represente el 36% del impacto para la etapa de construcción, al presentar un valor de  $7.10 \times 10^{-6}$  kg SO<sub>2</sub> eq /kWh. Hasta 0.0564 kg SO<sub>2</sub> eq se asocian a la producción de 1 kg de aluminio, principalmente por un proceso de electrolisis, donde se produce el 71% del impacto asociado a la acidificación (Aluminum Association, 2013). Al Hawari et al. (2014) reportan que la mayor parte del impacto en la categoría de acidificación se debe a la planta de energía que produce electricidad mediante el uso de fuentes fósiles.

El sistema de Gradiente Salino RED (Figura 62) tiene en la etapa de construcción un valor de 0.0013 kg SO<sub>2</sub> eq /kWh, que representa el 99% del impacto total, asociado a la contribución de 0.00126 kg SO<sub>2</sub> eq/kWh por la elaboración de los materiales de las membranas, principalmente estireno, tiene asociada la emisión de óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre, al igual que otros productos de la refinación del petróleo.

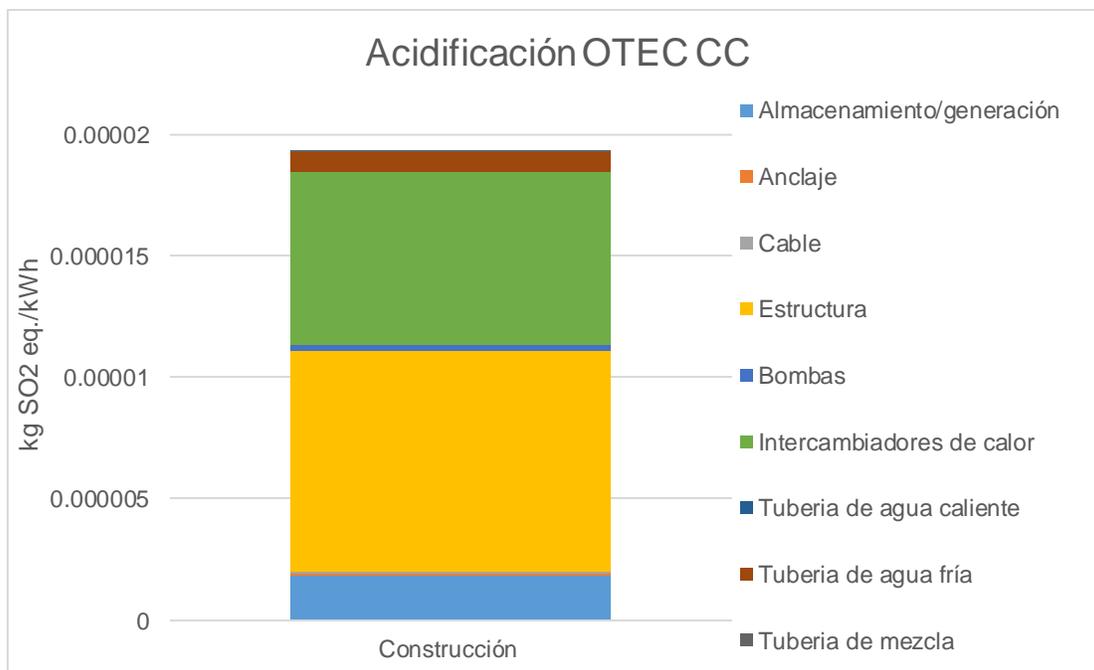


Figura 64. Categoría de Impacto de Acidificación para el sistema OTEC CC.

## 5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Uno de los temas de mayor importancia en el sistema OTEC es la selección del fluido de trabajo, dado que es la sustancia clave para la conversión de la energía. El amoníaco es una de las sustancias mayormente utilizadas en los procesos OTEC, debido a que tiene un amplio manejo con procesos establecidos y que con más eficiencia en la conversión de la energía (Garduño et al., 2017).

Además del amoníaco, el R-22 también es una sustancia utilizada en la industria OTEC, sin embargo, es un hidroclorofluorocarbono y se ha optado por la sustitución de estas sustancias en la industria, (SEMARNAT, 2014), algunos de los sustitutos propuestos son los hidrofluorocarbonos, como el R-134a. El R-134a, es una sustancia de amplio uso en la industria refrigerante, sin embargo, debido a su alto potencial de impacto en cambio climático, se ha buscado su sustitución por otras sustancias con un impacto directo menor. Como consecuencia, se ha buscado optar por el uso de refrigerantes con bajos potenciales de cambio climático, naturales o artificiales. El R-152a ha sido considerada como una de las opciones a su sustitución, debido a que representa una reducción considerable al efecto directo que tiene respecto al cambio climático, pues su potencial es casi una octava parte del producido por el R-134a, por lo que se considera un refrigerante de bajo potencial de cambio climático (Sanchez et al. 2017).

Según el manual de buenas prácticas de sustancias alternativas a los HCFC de la SEMARNAT, la tendencia de uso de sustancias refrigerantes tiene contemplado el uso de HFC, como el R-134a y el R-152a, pero espera la sustitución por refrigerantes naturales como el amoníaco y el dióxido de carbono (Yañez, 2014).

Por otro lado, el amoníaco es una sustancia altamente tóxica y inflamable, siendo estas características una de las razones por lo que se ha buscado la incorporación de otros refrigerantes que puedan servir de sustituto. De acuerdo al estándar 34 de la ASHREA (La Sociedad Americana de Ingenieros de

Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionad, por sus siglas en inglés) el amoniaco está dentro de la categoría B2, lo cual ndica que es una sustancia altamente tóxica y medianamente flameable.

El objetivo del análisis de sensibilidad presentado es evaluar los posibles impactos asociados a la elección de diferentes fluidos de trabajo, considerando siempre un margen de error, debido a que cada sustancia presenta propiedades termodinámicas diferentes, por lo que realizar escalamientos o aproximaciones a partir de un fluido conocido puede generar diversas incertidumbres.

En este caso, el equipo de trabajo de OTEC de CEMIE-Océano, sugirió la información proporcionada por Berdarnoni et al. (2019). En este trabajo se indica la densidad de energía asociada al área de contacto del intercambiador de calor ( $\gamma$ ) para diferentes sustancias utilizadas como fluidos de trabajo, como se puede observar en la Figura 65. El amoniaco, presenta la mayor densidad de potencia ,mientras que el R152a ocupa el quinto lugar de los refrigerantes modelados por Berdarnoni et al. (2019) y el R134a es el octavo. Esto indica que la eficiencia del amoniaco es mayor respecto al de otros refrigerantes. Otros trabajos refuerzan la idea sobre la alta eficiencia del amoniaco frente a otros fluidos (Yoon et al., 2014; Yañez, 2014; Li et al., 2017; Garduño et al., 2017).

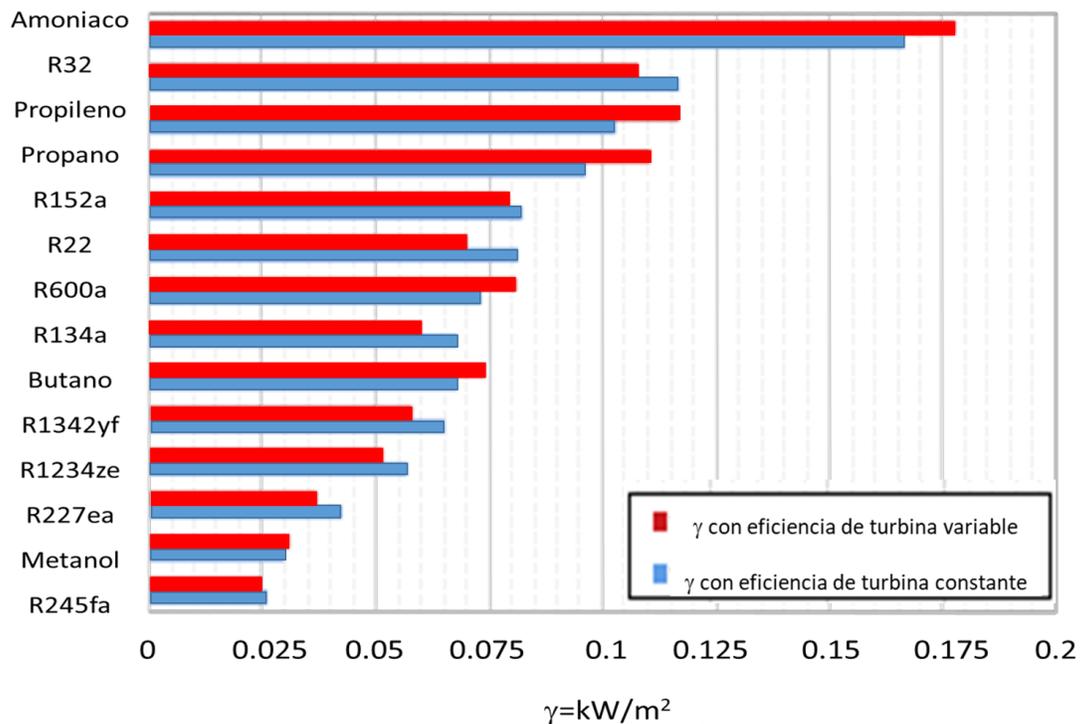


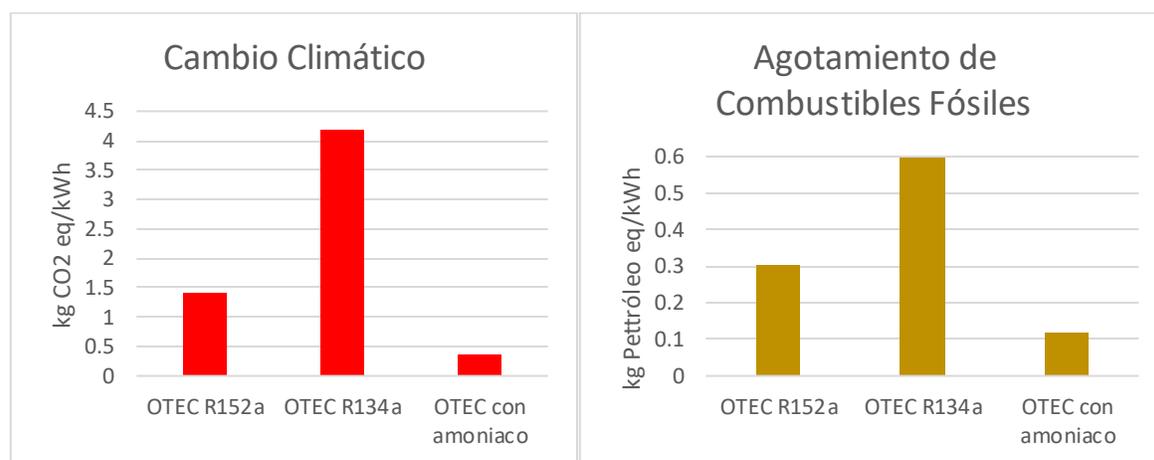
Figura 65. Densidad de poder  $\gamma$  para diferentes fluidos de trabajo (Berdarnoni et al., 2019).

Estos valores de densidad de poder para diferentes fluidos de trabajo se utilizaron, junto con el volumen conocido de amoniaco para la generación de energía y obtener un equivalente en kg para otras sustancias de trabajo. En este caso fue considerando el R152a, que es el fluido propuesto por los diseñadores del sistema de CEMIE-Océano y el R134a otra de las sustancias de uso común como refrigerante. Es importante recalcar que la eficiencia de otras sustancias respecto al amoniaco es menor, por lo que suponemos una cantidad mayor de fluido necesaria para la generación de la misma cantidad de energía. En este trabajo se consideró que, para la generación de 1 kWh, se requería de 0.0987232 kg de amoniaco, de esta forma para el R152a, que presenta casi la cuarta parte del trabajo W en kJ/kg respecto al amoniaco, requiere 0.197 kg. Para el caso del R134, el cual tienen un trabajo menor al de los dos anteriores, se requiere 0.2445 kg. Estos valores se observan en la Tabla 28. Los

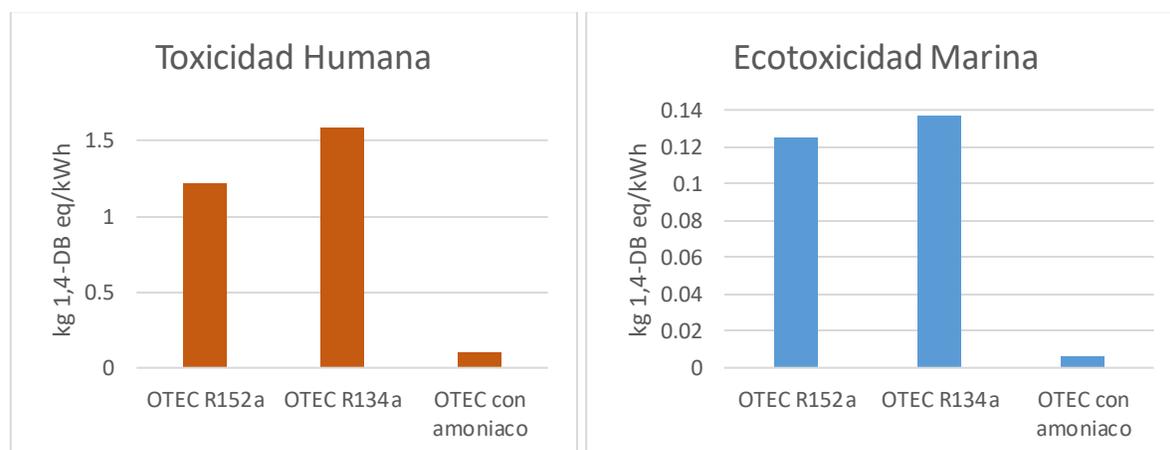
valores de masa obtenidos, se utilizaron para la modelación de tres escenarios, en el cual se usa cada una de las sustancias de trabajo. Los resultados totales de los escenarios se muestran en las Figuras 66-70.

**Tabla 28. Equivalencias de fluidos de trabajo obtenidas empleando la información publicada por Berdarnoni et al. (2019)**

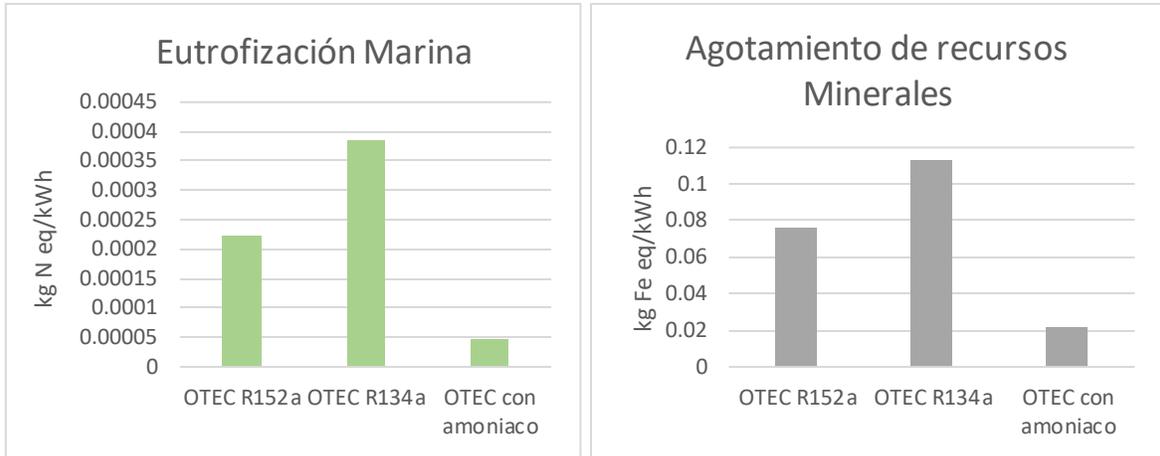
Sustancia	$\gamma$ (kW/m <sup>2</sup> )		Equivalencia entre refrigerantes	Masa kg
	$\eta$ de turbina, variable	$\eta$ de turbina, constante		
Amoniaco	0.1775	0.166	1	0.098723152
R32	0.108	0.116	1.431034483	0.141276235
R152a	0.0798	0.083	2	0.197446305
R22	0.07	0.081	2.049382716	0.202321522
R134a	0.06	0.067	2.47761194	0.244597661



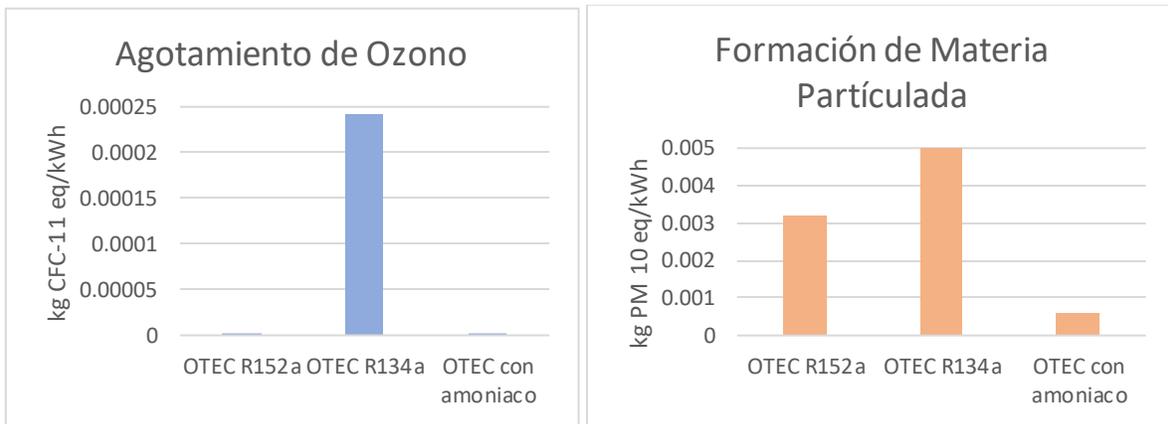
**Figura 66. Categorías de Impacto de Cambio Climático y Agotamiento de Combustibles Fósiles para tres escenarios OTEC CC.**



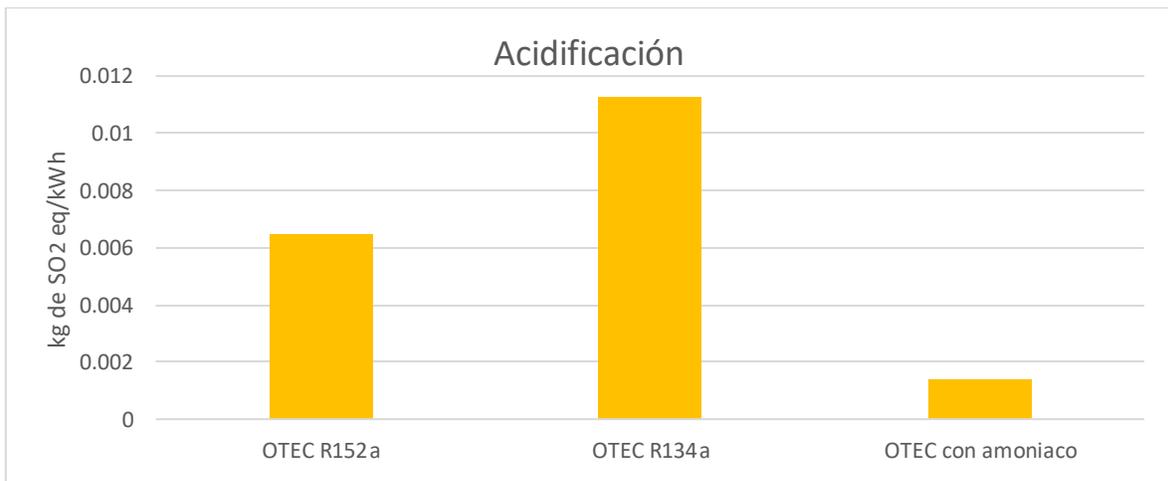
**Figura 67. Categorías de Impacto de Toxicidad humana y Ecotoxicidad Marina para tres escenarios de OTEC CC.**



**Figura 68. Categorías de Impacto de Eutrofización Marina y Agotamiento de recursos Minerales para tres escenarios OTEC CC.**



**Figura 69. Categorías de Impacto de Agotamiento de Ozono y Formación de Materia Particulada para tres escenarios OTEC CC.**



**Figura 70. Categoría de Acidificación para tres escenarios OTEC CC.**

Analizando los escenarios de OTEC se observa que el amoníaco, es el fluido de trabajo que presenta valores menores de impacto, mientras que el R152a y el R134a presentan valores mayores. Si se toma como ejemplo la categoría de impacto de cambio climático, se observa un aumento de casi 3 veces la proporción de R142a respecto al amoníaco y de 8 veces para el R134a.

Una de las razones de los altos impactos producidos por el R152a y el R134a está asociada a la suposición de un aumento de cantidad de fluido para la producción de la misma cantidad de energía.

Weckert (2008) presenta un ACV de diferentes refrigerantes, donde el R152a presenta un valor de 4.5 veces menor que el presentado por el R134a, mientras que en agotamiento de ozono es 15 veces menor. Reforzando la obtención de menores impactos asociados a la producción de R152a, respecto al R134a.

De acuerdo con Hill (2003) existe un mayor aporte de CO<sub>2</sub> equivalente en las emisiones indirectas para el R152a (alrededor del 90%), que, en las emisiones directas, mientras que en el caso del R134a la diferencia es mínima.

Bovea et al. (2007) realiza una evaluación de impactos mediante análisis de ciclo de vida para diferentes refrigerantes utilizados en centros comerciales. En este trabajo están incluidos el R134a y el amoníaco, indica que el amoníaco presenta valores de impacto menores para las categorías de impacto que proponen. Por lo que, sus resultados corroboran que en el presente trabajo el amoníaco tenga valores menores a los asociados al R134a.

La forma convencional de producción del amoníaco es a partir del metano presente en el gas natural (EFMA, 2000), mientras que el R152a y el R134a son producto del etano (Cabello et al., 2015). Esto justifica el impacto aportado en agotamiento de combustibles fósiles.

Las categorías de Cambio Climático y Toxicidad, humana y marina son dos puntos interesantes. Por un lado, el amoníaco es una sustancia altamente tóxica (Abas et al., 2018) por lo que requiere un manejo especializado y control exhaustivo para controlar las posibles fugas al ambiente, que no solo afectarían al personal de una planta de esta tecnología, si no que podría afectar gravemente a las comunidades y a los ecosistemas aledaños, es por eso que se ha investigado el uso de otros refrigerantes en los sistemas OTEC, tal como el R134a y el R152a. Sin embargo, aunque la toxicidad de estas sustancias es baja, según la ASHRAE, durante la producción tienen asociados impactos en estas categorías, pues, debido a sus bajas eficiencias, es requerida mayor cantidad.

Por otro lado, mientras se considera que el amoníaco no tiene potencial de cambio climático, los refrigerantes R152a y R134a sí lo tienen, además de que el segundo, presenta el valor más alto de los 3, como se aprecia en la Tabla 29 y a esto se le adiciona el valor que tienen asociado en la categoría de impacto de Cambio Climático por la producción de dichos compuestos.

Weckert et al. (2007) indica que el R152 es una de las sustancias con menores impactos asociados en las categorías que contempla, de las sustancias que reporta, entre ellas el R134a. Además de que es una sustancia de baja toxicidad, lo que le daría una ventaja en su uso directo, respecto al amoníaco, aunque ambas están en la misma categoría de inflamabilidad (SEMARNAT, 2014).

El amoníaco es una sustancia utilizada como refrigerante natural, con eficiencia térmica mayor que otros refrigerantes (Yoon et al., 2014; SEMARNAT, 2014; Li et al., 2017; Garduño et al., 2018). Como menciona Bovea et al. (2007) sus impactos asociados son menores a los presentados por otras sustancias como el R-134a, además, se pueden utilizar procesos de producción de amoníaco que implican reducción en los impactos asociados a su producción, por ejemplo, reducciones hasta alrededor de 77% en cambio climático, a la forma convencional de producción (Bicer et al., 2016). Los inconvenientes que presentan no son despreciables, pues según los estándares de la ASHRAE, es

una sustancia de alta toxicidad y mediana inflamabilidad, pero estos aspectos pueden ser resueltos con las medidas adecuadas prevención, control y mantenimiento (SEMARNAT, 2014).

**Tabla 29. Características de diferentes refrigerantes (Maina et al., 2015).**

Tipo	Refrigerante	Temperatura Crítica (°C)	Presión Crítica ( bar)	Potencial de agotamiento del ozono	Potencial de cambio climático (a 100 años)	Flamable o explosivo	Toxico
CFCs y HCFCs	R12	100.9	40.6	0.9	8100	No	No
	R22	96.2	49.8	0.055	1500	No	No
HFC puros	R32	78.4	58.3	0	650	Si	No
	R2134a	101.1	40.7	0	1200	No	No
	R152a	113.5	45.2	0	140	Si	No
HFC en mezcla	R404A	72.1	37.4	0	3300	No	No
	R407C	86.8	46	0	1600	No	No
	R410A	72.5	49.6	0	1900	No	No
Refrigerantes naturales	Propano ( R290)	96.8	42.5	0	3	Si	No
	Isobutano (R600a)	135	36.5	0	3	Si	No
	Amoniaco (R717)	132.2	113.5	0	0	Si	Si
	Dióxido de carbono ( R744)	31	73.8	0	1	No	No

El amoniaco es la sustancia utilizada con mayor eficiencia para los sistemas OTEC, pero la búsqueda de sustancias que provoquen impactos menores directos es muy importante. Se debe procurar que estas sustancias, además, puedan tener mejores desempeños para poder utilizar menores cantidades, con la espera de que la reducción de cantidad de fluido a producir reduzca también los impactos asociados a dicha sustancia. El ejemplo de una sustancia que podría ser un buen sustituto del amoniaco es el CO<sub>2</sub>, que se ha pensado podría funcionar en sistemas de conversión termoeléctrica en un ciclo crítico y llegar hasta eficiencias del 50% (Dufour, 2016).

Bovea et al. (2008) prevee un mejor desempeño del CO<sub>2</sub> desde un punto de vista ambiental, por lo que se invita a aumentar la implementación de esta sustancia.

Además de que tiene ventaja sobre el amoniaco al ser una sustancia de baja toxicidad y baja inflamabilidad, y sus potenciales de agotamiento de ozono y cambio climático son 0 y 1, respectivamente, teniendo ventaja sobre el R152a y el R134a (SEMARNAT, 2014).

## 6. CONCLUSIONES

Empleando la metodología de ACV se realizó una primera aproximación a los impactos asociados a tecnologías de generación eléctrica en desarrollo, permitiendo identificar aspectos de importancia para revisar en esta etapa de desarrollo.

Es importante mencionar que se espera que estas tecnologías representen el suministro de localidades específicas y que funcionen simultáneamente con otras formas de generación eléctrica de bajo impacto ambiental.

Los impactos asociados a los dispositivos de generación de energía del océano son, en general, menores a los impactos relacionados a la generación que utiliza fuentes fósiles.

Los dispositivos revisados en este trabajo, presentan valores menores para casi todas las categorías de impacto a la forma convencional de generación eléctrica de México, y resultados comparables a los de dispositivos semejantes y a otros relacionados a fuentes renovables de energía. Estas categorías son cambio climático, agotamiento de combustibles fósiles, toxicidad humana, eco toxicidad marina, agotamiento de la capa de ozono, formación de materia particulada y acidificación. Al igual que otros dispositivos de energía renovable, entre ellos los asociados a energías del océano, se presentan valores mayores que los de sistemas convencionales, en la categoría de impacto de agotamiento de recursos minerales.

Debido a las particularidades propias de cada dispositivo, el comportamiento de los impactos presentó diferencias, por lo que cada dispositivo tuvo mayor valor en categorías de impacto específicas.

El generador SeaGen ha demostrado en este estudio, y en otros, ser uno de los sistemas de energía renovable con menores impactos asociados. Tiene mayor participación en categorías de impacto como toxicidad humana, acidificación y agotamiento de recursos minerales, donde supera a los sistemas OTEC CC y de gradiente salino RED.

En este caso fue utilizado principalmente como un sistema de referencia, pues este es un modelo existente comercial, por lo que sirve para comparar los sistemas revisados en este estudio, que toman como referencia modelos de la literatura o modelos experimentales, como el Hidrogenerador IMPULSA.

El principal problema con el hidrogenador IMPULSA es su baja capacidad de generación y tiempo de vida reducidos, lo que tiene como resultado que sus impactos sean, en general, mayores en comparación con los otros dispositivos. Esto es debido a que es un sistema de pruebas, por lo que se espera que su escalamiento comercial tenga asociada un aumento de estas características, por lo que sus impactos se reducirían. Aun así, su impacto respecto a la producción convencional de energía es menor en la mayoría de los casos, exceptuando la categoría de agotamiento de recursos minerales, por lo que la utilización de materiales reciclados podría contribuir a una reducción del impacto.

Los sistemas de gradiente salino, en teoría son de los más prometedores para la generación de energía, aunque en la realidad aún no se ha llegado a las eficiencias necesarias para poder ser tecnologías competitivas.

Gradiente salino presentó valores más altos que el método convencional de generación eléctrica en la categoría de eutrofización marina. En comparación con los otros sistemas, además de eutrofización marina, resalta su impacto en la categoría de agotamiento de combustibles fósiles, pues las membranas requieren productos derivados del petróleo. Tiene un menor impacto que el Hidrogenerador IMPULSA y OTEC CC en cambio climático y toxicidad humana, y es el dispositivo de menor impacto en las categorías de recursos minerales y acidificación.

Las membranas son el elemento de mayor relevancia en este dispositivo, pues es donde se encuentran la mayor parte de los impactos. El aumento en la eficiencia de transferencia de electrones buscado en las membranas podría significar una reducción del tamaño de las pilas, reduciendo la cantidad de material utilizado y reduciendo los impactos asociados

Revisar el tipo de materiales utilizados para la fabricación de las membranas también es importante, de modo que la búsqueda de mejores eficiencias no conlleve al empleo de materiales y procesos de fabricación de mayor impacto. El acoplamiento con otros sistemas productivos, como la producción de sal, podría ser también ventajosa al momento de buscar una reducción en los impactos ambientales asociados a esta tecnología.

La implementación de planes de manejo para la disposición de las membranas también es importante, para poder llevar a cabo la mejor forma de disposición del material, reduciendo así los posibles impactos generados por una mala disposición final. Sugerir la elaboración de estos planes de manejo en esta etapa temprana del desarrollo, podría significar para estas tecnologías una ventaja respecto a otras ya utilizadas con procesos de disposición final poco apropiados.

Los sistemas OTEC son actualmente utilizados en Hawái, Corea y Japón, y se encuentran más cercanos a una eficiencia comercial real aceptable que otros sistemas de generación a partir del océano. México presenta una ventaja respecto a estos países, donde el periodo de generación es reducido debido a la disminución del gradiente de temperatura necesario para la generación eléctrica durante las estaciones frías.

La magnitud de los impactos asociados a la construcción de la planta respecto a la cantidad de energía que se busca generar es baja en comparación a sistemas de generación tradicionales, aunque eso no quiere decir que no se pueda buscar la incorporación de materiales reciclados o reutilización de elementos.

El tema central con las tecnologías OTEC es el fluido de trabajo. El amoníaco, por un lado, es una de las sustancias con mejor desempeño en estos sistemas, lo que reduce las cantidades a utilizar y además es una sustancia con lineamientos de manejo industrial mejor establecidos que otras sustancias, aunque es bien conocido como una sustancia altamente tóxica, cuya liberación al ambiente podría traer consecuencias desastrosas. La búsqueda de otros fluidos de trabajo no debe pasar por alto los impactos asociados a la fabricación de dicho fluido, además de los impactos asociados por posibles emisiones directas. Aunque por el momento las eficiencias alcanzadas por otros refrigerantes son menores, es importante el esfuerzo en la búsqueda de refrigerantes sustitutos, que podría llegar a la revisión del CO<sub>2</sub> como fluido de trabajo en estos sistemas.

Otro de los puntos a revisar en el caso de los sistemas OTEC, es la elaboración de los intercambiadores de calor y la estructura, por lo que se sugiere el aumento del uso de material reciclado en su elaboración.

Se espera que, a futuro, las eficiencias de estas tecnologías aumenten, por lo que serán una opción viable en la transición energética. También se espera la utilización de nuevos materiales que aumenten la durabilidad de los equipos. Tal es el caso de recubrimientos especiales para evitar la corrosión. Este tipo de materiales deberán, a su tiempo, ser evaluados para ver sus ventajas ambientales, respecto a otros recubrimientos convencionales.

# REFERENCIAS

Aalbers, R. R. D. (2015). Life cycle assessment of ocean thermal energy conversion: The life cycle impact of electricity supply in small island regions.

Abas, N., Kalair, A. R., Khan, N., Haider, A., Saleem, Z., & Saleem, M. S. (2018). Natural and synthetic refrigerants, global warming a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 557-569.

Abbasi, S.A., and N. Abbasi. 2000. The likely adverse environmental impacts of renewable

Ahmadian, R., & Falconer, R. A. (2012). Assessment of array shape of tidal stream turbines on hydro-environmental impacts and power output. *Renewable Energy*, 44, 318-327.

Al Hawari, A., Khader, M., El Hasan, W., Alijla, M., Manawi, A., & Benamour, A. (2014). A Life Cycle Assessment (LCA) of Aluminum Production Process. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 8(4), 704-710.

Allender, J. H., Ditmars, J. D., Paddock, R. A., & Saunders, K. D. (1978). OTEC physical and climatic environmental impacts: an overview of modeling efforts and needs (No. CONF-780236-1). Argonne National Lab., Ill. (USA).

Aluminum Association. (2013). The environmental footprint of semi-finished aluminum products in North America. A life cycle assessment report.

Amy, G., Ghaffour, N., Li, Z., Francis, L., Linares, R. V., Missimer, T., & Lattemann, S. (2017). Membrane-based seawater desalination: Present and future prospects. *Desalination*, 401, 16-21.

Anaya-Durand, A., & Pedroza-Flores, H. (2008). Escalamiento, el arte de la ingeniería química: plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. *Tecnología, ciencia, educación*, 23 (1), 31-39.

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*.

Asahi Glass Co. LTD. Selemion™ Ion-exchange membranes. AGC Engineering Co. LTD. Japón. Recuperado de: <https://www.agec.co.jp/selemion/SELC.pdf>

Aviña Jiménez, Héctor Miguel sustentante (2007). Factibilidad de instalar una planta OTEC (conversión de la energía térmica del océano) en las costas de México.

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*, 5(2), 535-540.

Banerjee, R. *Renewable Energy in India: From the Margins to Mainstream*.

Bárceñas Graniel, Juan Francisco, sustentante. (2014). Evaluación del potencial de conversión de energía renovable en el mar caribe mexicano

Bernal Francisco, Marisela, sustentante (2016) Estudio técnico y económico de una planta OTEC y sus usos secundarios en México

Bernardoni, C. H. R. I. S. T. I. A. N., Binotti, M., & Giotri, A. (2019). Techno-economic analysis of closed OTEC cycles for power generation. *Renewable Energy*, 132, 1018-1033.

- Bicer, Y., Dincer, I., Zamfirescu, C., Vezina, G., & Raso, F. (2016). Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1379-1395.
- Bijmans, M. F. M., Burheim, O. S., Bryjak, M., Delgado, A., Hack, P., Mantegazza, F. ... & Hamelers, H. V. M. (2012). Capmix-deploying capacitors for salt gradient power extraction. *Energy Procedia*, 20, 108-115.
- Blunden, L. S., & Bahaj, A. S. (2007). Tidal energy resource assessment for tidal stream generators. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 221(2), 137-146.
- Boehlert, G. W., & Gill, A. B. (2010). Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: a current synthesis. *Oceanography*, 23(2), 68-81.
- Bolaji, B. O., & Huan, Z. (2013). Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant—a review. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 18, 49-54.
- Bovea, M. D., Cabello, R., & Querol, D. (2007). Comparative life cycle assessment of commonly used refrigerants in commercial refrigeration systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(5), 299.
- BP (2017) Statistical review of world energy. June 2017. Recuperado el 27 de agosto de 2017 de: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>
- Bruciaga, W., Escobar, C. (2016) Cemie-oceano, con la mirada puesta en la energía del mar. Recuperado el 14 de agosto de 2017 de: <http://proyectofse.mx/2016/04/06/cemie-oceano-y-la-energia-del-mar/>
- Bullón, Fernando (2006) el mundo ante el cenit del petróleo. Asociación para el estudio de los recursos energéticos. Recuperado de <https://www.crisisenergetica.org/staticpages/index.php?page=200509171321310#hubbert>
- Cabello, J., Rojas, A., Mateos, E. (2017) Corrientes y mareas como fuentes generadoras de energía: Estado del arte. Cemie-oceano
- Cabello, R., Sánchez, D., Llopis, R., Arauzo, I., & Torrella, E. (2015). Experimental comparison between R152a and R134a working in a refrigeration facility equipped with a hermetic compressor. *International journal of refrigeration*, 60, 92-105.
- Campos Hernández, Arturo (2017) Diseño y construcción de una turbina de vapor y su adaptación a un generador eléctrico. UNAM. México
- Cemie océano (2017) Centro mexicano de innovación en energía océano. Recuperado el 14 de agosto de 2017 de: <http://cemieoceano.mx/index.html>
- Central Intelligence Agency, 2016. *The World Factbook 2016-17*. Washington, DC. Recuperado de
- Clark, R. H. (2007). *Elements of tidal-electric engineering* (Vol. 33). John Wiley & Sons. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=P5OxZ7d6qVEC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Clark,+R.H.,+Elements+of+Tidal-Electric+Engineering,+2007:+John+Wiley+and+Sons.&ots=LVLKcPHBp&sig=bJw08Cw94KmjlNgtXein3ZNmew#v=onepage&q=Clark%2C%20R.H.%2C%20Elements%20of%20>

Tidal-  
Electric%20Engineering%2C%202007%3A%20John%20Wiley%20and%20Sons.&f=false

Cook, J., Oreskes, N., Doran, P. T., Anderegg, W. R., Verheggen, B., Maibach, E. W. ... & Nuccitelli, D. (2016). Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. *Environmental Research Letters*, 11(4), 048002

Daniilidis, A., Herber, R., & Vermaas, D. A. (2014). Upscale potential and financial feasibility of a reverse electro dialysis power plant. *Applied energy*, 119, 257-265

De la Garza Cuevas, César Francisco, (2016) Propuesta de diseño de un vaporizador para una planta OTEC de 1 MWE 2016. UNAM. México

Dessne, P., Fachina, V., Golmen, L. G., Miller, A. K., Panchal, C. B., Hammar, L., ... & Baird, J. (2015). *OTEC matters 2015*. Höskolan i Borås.

Devault, D. A., & Péné-Annette, A. (2017). Analysis of the environmental issues concerning the deployment of an OTEC power plant in Martinique. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(33), 25582-25601.

Devecioğlu, A. G., & Oruç, V. (2015). Characteristics of some new generation refrigerants with low GWP. *Energy Procedia*, 75, 1452-1457.

Douglas, C. A., Harrison, G. P., & Chick, J. P. (2008). Life cycle assessment of the Seagen marine current turbine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 222(1), 1-12.

Douziech, M., Hellweg, S., & Verones, F. (2016). Are Wave and Tidal Energy Plants New Green Technologies?. *Environmental science & technology*, 50(14), 7870-7878.

Dufour, J. (2016). CO2 supercrítico: El fluido del futuro para la generación de electricidad en las plantas termosolares actuales. Recuperado de: <https://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2016/01/11/132826>

EC (2006) World energy technology outlook-2050, European commission, Luxembourg: Office for official publications of the European communities, 2006

EC (2014) Executive summary of the impact assessment. Recuperado el 20 de agosto de 2017 de: [https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/sites/maritimeaffairs/files/docs/body/swd\\_2014\\_12\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/sites/maritimeaffairs/files/docs/body/swd_2014_12_en.pdf)

EC (2014) Impact assessment. Recuperado el 20 de agosto de: [https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/sites/maritimeaffairs/files/docs/body/swd\\_2014\\_13\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/sites/maritimeaffairs/files/docs/body/swd_2014_13_en.pdf)

ECB (2014) Commission staff working document executive summary of the impact assessment. European commission. Brussels. Recuperado el 16 de agosto de 2017 de: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/txt/?uri=celex%3a52014sc0208>

Ecotricity (2017). The end of fossil fuels. Recuperado de <https://www.ecotricity.co.uk/our-green-energy/energy-independence/the-end-of-fossil-fuels>

EFMA, European Fertilizer Manufacturers' Association. (2000). Production of ammonia. Belgica

EMEC (2017) the european marine energy centre ltd. Recuperado de <http://www.emec.org.uk/>

Energy, B. (2014). Action needed to deliver on the potential of ocean energy in European seas and oceans by 2020 and beyond. European Commission, January.

Equimar (2010) Equimar project deliverables. Recuperado el 16 de agosto de 2017 de: <http://www.equimar.org/equimar-project-deliverables.html>

Estévez, I., González, M., Jiménez, J., Álvarez, J. (2014) Energía mareomotriz, gran oportunidad para México. Memorias del concurso IDIT 2014

F. George, J & Richards, D & L. Perini, L. (1979). Baseline design of an OTEC pilot plantship. Volume A. Detailed report. NASA STI/Recon Technical Report N.

Falnes, J., & Løvseth, J. (1991). Ocean wave energy. *Energy policy*, 19(8), 768-775.

Fernández Díez, P. (2008). Energía mareomotérmica centrales (ceto). En p.f. díez, energía mareomotérmica (pag.2). Cantabria: universidad de cantabria.

Ferrari, I (2008) El fin de la era del petróleo y la transición a las energías renovables. Centro de geociencias. Recuperado de [http://www.geociencias.unam.mx/geociencias/desarrollo/ferrari\\_cie\\_08\\_08.pdf](http://www.geociencias.unam.mx/geociencias/desarrollo/ferrari_cie_08_08.pdf)

Frischknecht, R., & Joliet, O. (2016). Global guidance for life cycle impact assessment indicators. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, Paris.

García Huante, Alejandro, sustentante (2015) Posibles efectos oceanográficos por la operación de una planta OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) en la zona de Puerto Ángel, Oaxaca, México

Garduño Ruiz, E. P., A. García huante, y. Rodríguez Cueto, J. F. Bárcenas Graniel, y M. Á. Alatorre Mendieta (2017). Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC) estado del arte. CeMIE-Océano, Universidad Autónoma de Campeche. 108 p.

Garza Cuevas, César Francisco de la, sustentante (2016) Propuesta de diseño de un vaporizador para una planta OTEC de 1 MWE

Gastelum Zepeda, L. (2017). Life Cycle Assessment of a Wave Energy Converter.

Gavankar, S., Suh, S., & Keller, A. A. (2015). The role of scale and technology maturity in life cycle assessment of emerging technologies: a case study on carbon nanotubes. *Journal of Industrial Ecology*, 19(1), 51-60.

George, J. F., Richards, D., & Perini, L. L. (1979). Baseline design of an OTEC pilot plantship. Volume A. Detailed report. NASA STI/Recon Technical Report N, 80.

GOB (2015) Centros mexicanos de innovación en energía. Recuperado el 16 de agosto de 2017 de: <https://www.gob.mx/sener/articulos/centros-mexicanos-de-innovacion-en-energia>

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.

Goldman, A. (2012) Tidal energy (tidal power) facts. Recuperado el 23 de agosto de 2017 de: <http://www.renewablegreenenergypower.com/tidal-energy-tidal-power-facts/>

Grall, J., & Chauvaud, L. (2002). Marine eutrophication and benthos: the need for new approaches and concepts. *Global Change Biology*, 8(9), 813-830.

GreenHouse Gas Protocol (2016) Global Warming Potential Values. Recuperado de : [https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29\\_1.pdf](https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf)

- Güereca L.P (2014) Centro mexicano de innovación en energía renovable- océano, base de datos ciclo de vida: Energías del océano. Instituto de Ingeniería de la UNAM
- Güereca L.P. (2006). Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis del ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales. Tesis para obtener el grado de doctora en ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España
- Güler, E., Elizen, R., Saakes, M., & Nijmeijer, K. (2014). Micro-structured membranes for electricity generation by reverse electrodialysis. *Journal of membrane science*, 458, 136-148.
- Güney, M. S., & Kaygusuz, K. (2010). Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2996-3004.
- Hans Chr., S., Stefan, N., Stefan, A., & Hauschild, M. Z. (2007). Life cycle assessment of the wave energy converter: Wave Dragon. Poster session presented at Conference in Bremerhaven,.
- Hill, W. (2003). HFC152a as the alternative refrigerant. Rescatado de <http://ec.europa.eu/environment/archives/mac2003/pdf/hill.pdf>
- Hiriart Le Bert, G. (2009). Potencial energético del alto Golfo de California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61(1), 143-146.
- Hong, J. G., & Chen, Y. (2014). Nanocomposite reverse electrodialysis (RED) ion-exchange membranes for salinity gradient power generation. *Journal of membrane science*, 460, 139-147.
- Hubbert, M. K. (1949). Energy from fossil fuels. *Science*, 109(2823), 103-109.
- IEA (2016) Electricity information, International Energy Agency. Recuperado el 30 de agosto de 2017 de <http://www.iea.org/statistics/topics/electricity/>
- INEEL (2016) Cemie. Recuperado el 12 de agosto de 2017 de: <https://www.ineel.mx/cemie.html>
- ISO. (2006). ISO 14000/44 Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines. International organization for standardization
- Khan, N., Kalair, A., Abas, N., & Haider, A. (2017). Review of ocean tidal, wave and thermal energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 590-604.
- Knoeri, C., Sanyé-Mengual, E., & Althaus, H. J. (2013). Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. *The international journal of life cycle assessment*, 18(5), 909-918.
- LAERFTE, Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética. Diario Oficial de la Federación. México. 07-06-2013.
- LTE, Ley de Transición Energética. Diario Oficial de la Federación. México. 24-12-2015.
- Li, D., Zhang, L., Duan, X., & Tian, X. (2017, November). Thermodynamic Analysis of Ocean Thermal Energy Conversion System with Different Working Fluids. In ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (pp. V006T08A093-V006T08A093). American Society of Mechanical Engineers.
- Li, Y., & Pan, D. Z. (2017). The ebb and flow of tidal barrage development in Zhejiang Province, China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 380-389.
- Llopis Doménech, R., Sanchez García-vacas, D., cabello López, R., & Torrella Alcaraz, E. Comparativa energética y medioambiental de sistemas de refrigeración de doble etapa.

López G. José (2011) Desarrollo de un dispositivo de conversión de energía de las corrientes marinas. UNAM

Maina, P., & Huan, Z. (2015). A review of carbon dioxide as a refrigerant in refrigeration technology. *South african journal of science*, 111(9-10), 01-10.

Mariño, I., Enríquez, C., López, J., Papiol, V., Rioja, R. (2017) Caracterización de la intensidad, dirección y variabilidad espacio-temporal de las corrientes marinas en el canal de Cozumel. *Cemicoceano*

Meegahapola, L., Udawatta, L., & Witharana, S. (2007). The Ocean Thermal Energy Conversion strategies and analysis of current challenges. In 2007 International Conference on Industrial and Information Systems (pp. 123-128). IEEE.

Meghwar, A., Haq, L., & Irshad, N. (2017). Techno Economic Evaluation of Off-Grid Hybrid Solar Wind Power System for Village MaloBheel, Tharparkar Sindh Pakistan. *American Journal of Energy and Research*, 5(2), 28-34.

Miller, R. R., Newhook, R., & Poole, A. (1994). Styrene production, use, and human exposure. *Critical Reviews in Toxicology*, 24(sup1), S1-S10.

Mistry, M., Gediga, J., & Boonzaier, S. (2016). Life cycle assessment of nickel products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(11), 1559-1572.

Moriarty, P., & Honnery, D. (2012). What is the global potential for renewable energy? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 244-252.

Muetze, A., & Vining, J. G. (2006, October). Ocean wave energy conversion-a survey. In Conference record of the 2006 IEEE industry applications conference forty-first IAS annual meeting (Vol. 3, pp. 1410-1417). IEEE.

Nasir Mehmood, Z. L., & Khan, J. (2012). Diffuser augmented horizontal axis tidal current turbines. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(18), 3522-3532. News direct

News direct (2013) Wales plans to build tidal power lagoon in Swansea. Recuperado el 26 de agosto de 2017 de: <https://www.youtube.com/watch?v=uerajo8ss4e>

Norris, J. V., & Droniou, E. (2007, September). Update on EMEC activities, resource description, and characterisation of wave-induced velocities in a tidal flow. In Proc. 7th European wave and tidal energy Conference, Porto, Portugal.

ORECCA (2011) Environment, regulation and legislation. Recuperado el 20 de agosto de 2017 de: [http://www.orecca.eu/c/document\\_library/get\\_file?uuid=da905529-e66c-4a3f-92da-4af2e19d5a4d&groupid=10129](http://www.orecca.eu/c/document_library/get_file?uuid=da905529-e66c-4a3f-92da-4af2e19d5a4d&groupid=10129)

Outcalt, S. L., & McLinden, M. O. (1996). A Modified Benedict-Webb-Rubin Equation of State for the Thermodynamic Properties of R152a (1, 1-difluoroethane). *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 25(2), 605-636.

Papadakis, G. (2006) Análisis del ciclo de vida. Recuperado el 12 de agosto de 2017 de: [http://www.ecoil.tuc.gr/lca-2\\_sp.pdf](http://www.ecoil.tuc.gr/lca-2_sp.pdf)

Papapetrou, M., & Kumpavat, K. (2016). Environmental aspects and economics of salinity gradient power (SGP) processes. In *Sustainable energy from salinity gradients* (pp. 315-335). Woodhead Publishing.

- 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*, 221(8), 1119-1130.
- Pattle, R. E. (1954). Production of electric power by mixing fresh and salt water in the hydroelectric pile. *Nature*, 174(4431), 660.
- Pelc, R., & Fujita, R. M. (2002). Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*, 26(6), 471-479.
- Piccinno, Fabiano & Hischer, Roland & Seeger, Stefan & Som, Claudia. (2016). From laboratory to industrial scale: a scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies. *Journal of Cleaner Production*. 135. 10.1016/j.jclepro.2016.06.164.
- Pinder, R. W., Gilliland, A. B., & Dennis, R. L. (2008). Environmental impact of atmospheric NH<sub>3</sub> emissions under present and future conditions in the eastern United States. *Geophysical Research Letters*, 35(12).
- Post, J. W., Goeting, C. H., Valk, J., Goinga, S., Veerman, J., Hamelers, H. V. M., & Hack, P. J. F. M. (2010). Towards implementation of reverse electrodialysis for power generation from salinity gradients. *Desalination and water treatment*, 16(1-3), 182-193.
- Power Technology, (2019). Cornwall Ontario River Energy Project. Recuperado de <https://www.power-technology.com/projects/cornwall-ontario-river-energy-project/>
- PRé. ReCiPe. (2012) Recuperado de <https://www.pre-sustainability.com/recipe>
- Quinby-Hunt, M. S., Wilde, P., & Dengler, A. T. (1986). POTENTIAL ENVIRONMENTAL IMPACTS OF OPEN-CYCLE THERMAL ENERGY. *Environ Impact Assess Rev*, 6, 77-93.
- Quinby-Hunt, M. S., Sloan, D., & Wilde, P. (1987). Potential environmental impacts of closed-cycle ocean thermal energy conversion. *Environmental Impact Assessment Review*, 7(2), 169-198.
- Raventos, A., Simas, T., Moura, A., Harrison, G., Thomson, C., & Dhedin, J. F. (2010). Life cycle assessment for marine renewable (Vol. 6). *EquiMar, Tech. Rep.*
- Ramsey, D., Ghosh, A., Abbaszadegan, A., & Choi, J. (2014). Life Cycle Assessment of Pre-cast Concrete vs. Cast-in-place Concrete.
- REA power (2014) Project scope: Aims and objectives of REApower. Recuperado el 10 de abril de 2018 de <https://www.reapower.eu/project-scope/-project-scope.html>
- Romero, B. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Morelos boletín* 3. 91-97. Recuperado el 10 de agosto de 2017 de: <https://www.ineel.mx/boletin032003/tend.pdf>
- Rourke, F. O., Boyle, F., & Reynolds, A. (2010). Tidal energy update 2009. *Applied Energy*, 87(2), 398-409.
- 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*, 43(16), 6406-6413
- SALAET FERNÁNDEZ, S. T. É. P. H. A. N. E., & ROCA JUSMET, J. O. R. D. I. (2010). Agotamiento de los combustibles fósiles y emisiones de CO<sub>2</sub>: algunos posibles escenarios futuros de emisiones. *Revista Galega de Economía*, 19(1).

Sánchez, D., Cabello, R., Llopis, R., Arauzo, I., Catalán-Gil, J., & Torrella, E. (2017). Energy performance evaluation of R1234yf, R1234ze (E), R600a, R290 and R152a as low-GWP R134a alternatives. *International Journal of Refrigeration*, 74, 269-282.

Sangiuliano, S. J. (2017). Turning of the tides: Assessing the international implementation of tidal current turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 971-989.

Sangjo Han (2013) 20 kW OTEC turbine development. Asia pacific clean energy. Recuperado de [http://hinmrec.hnei.hawaii.edu/wp-content/uploads/2013/09/4.4-han-s\\_-20kw-otec-tg.pdf](http://hinmrec.hnei.hawaii.edu/wp-content/uploads/2013/09/4.4-han-s_-20kw-otec-tg.pdf)

SEMARNAT (2002). Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM2.5. Recuperado de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>

SEMARNAT (2014) Manual Buenas Prácticas en el uso de Sustancias Alternativas a los HCFC, México.

SEMARNAT (2015). Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030, Instrumentación. México, Obtenido de <http://www.gob.mx/semarnat/articulos/compromisos-de-mitigacion-y-adaptacion-2020-2030>

SENER (2013) Prospectiva del sector eléctrico 2013-2027. Recuperado el 30 de agosto de 2017 de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62949/prospectiva\\_del\\_sector\\_el\\_ctrico\\_2013-2027.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62949/prospectiva_del_sector_el_ctrico_2013-2027.pdf)

SENER (2015) Centros Mexicanos de Innovación y Tecnología. Recuperado el 14 de agosto de 2017 de: [http://sustentabilidad.energia.gob.mx/res/cemie\\_general.pdf](http://sustentabilidad.energia.gob.mx/res/cemie_general.pdf)

SENER (2017) Programa Especial Para la Transición Energetica 2017-2018. Recuperado de : <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/213322/PETE.pdf>

SENER (2018) Prospectiva del Sector Eléctrico 2018-2032. Recuperado de: [https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PSE\\_18\\_32\\_F.pdf](https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PSE_18_32_F.pdf)

SETAC, U. (2016). Global guidance for life cycle impact assessment indicators (Vol. 1). Paris: United Nations Environment Programme.

Simon, B., Bachtin, K., Kiliç, A., Amor, B., & Weil, M. (2016). Proposal of a framework for scale-up life cycle inventory: A case of nanofibers for lithium iron phosphate cathode applications. *Integrated environmental assessment and management*, 12(3), 465-477.

Solomon, S. (1999). Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. *Reviews of Geophysics*, 37(3), 275-316

Soerensen, H. C., & Weinstein, A. (2008, January). Ocean energy: position paper for IPCC. In *IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources—Proceedings* (pp. 93-102).

Student energy (2015) Tidal power 101. Recuperado el 26 de agosto de 2017 de: <https://www.youtube.com/watch?v=vktrctydsyk>

Tedesco, M., Cipollina, A., Tamburini, A., & Micale, G. (2017). Towards 1 kW power production in a reverse electrodialysis pilot plant with saline waters and concentrated brines. *Journal of Membrane Science*, 522, 226-236.

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*, 24(1), 51-63.

- Tidal power. (2012) Recuperado el 26 de agosto de 2017 de: <https://www.youtube.com/watch?v=gs9v1jt5rfi>
- TM (2017) Tipos de mareas. Recuperado el 24 de agosto de 2017 de: <http://www.tablademareas.com/mareas/tipos-mareas>
- Uihlein, A. (2016). Life cycle assessment of ocean energy technologies. *The international journal of life cycle assessment*, 21(10), 1425-1437.
- Uihlein, A., & Magagna, D. (2016). Wave and tidal current energy—A review of the current state of research beyond technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1070-1081.
- UNEP (2016) Global guidance for life cycle impact assesment indicators. Frischknecht R and Jolliet O (Eds) Volume 1, Guide produced by UNEP"/SETAC Life Cycle INitiative. United Nations Environment Programme, 2016. París, France, 166 p ISBN: 978-92-807-3630-4
- Valdés Aragonés, I. (2014): "El tesoro transparente". *El País Semanal*, 16-3-2014
- Vallejo, Sara & Sánchez, Carlos. (2015). Aproximación al diseño de un generador de energía a partir de gradiente salino mediante Electrodiálisis Inversa.
- Veerman, J., De Jong, R. M., Saakes, M., Metz, S. J., & Harmsen, G. J. (2009). Reverse electro dialysis: Comparison of six commercial membrane pairs on the thermodynamic efficiency and power density. *Journal of Membrane Science*, 343(1-2), 7-15.
- Veerman, J., Saakes, M., Metz, S. J., & Harmsen, G. J. (2009). Reverse electro dialysis: Performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water. *Journal of Membrane Science*, 327(1-2), 136-144.
- Veerman, J., Saakes, M., Metz, S. J., & Harmsen, G. J. (2010). Electrical power from sea and river water by reverse electro dialysis: a first step from the laboratory to a real power plant. *Environmental science & technology*, 44(23), 9207-9212.
- Vega, L. A. (2012). Ocean thermal energy conversion. *Encyclopedia of sustainability science and technology*, 7296–7328.
- Vega, L. A., & Michaelis, D. (2010, January). First generation 50 MW OTEC plantship for the production of electricity and desalinated water. In *Offshore technology conference. Offshore Technology Conference*.
- Vermaas, D. A., Saakes, M., & Nijmeijer, K. (2011). Doubled power density from salinity gradients at reduced intermembrane distance. *Environmental science & technology*, 45(16), 7089-7095.
- Vermaas, D. A., Saakes, M., & Nijmeijer, K. (2011). Power generation using profiled membranes in reverse electro dialysis. *Journal of membrane science*, 385, 234-242.
- Viola, A., Franzitta, V., Curto, D., Di Dio, V., Milone, D., & Rodonò, G. (2015, May). Environmental impact assessment (EIA) of wave energy converter (WEC). In *OCEANS 2015-Genova* (pp. 1-4). IEEE.
- Walker, S., & Howell, R. (2011). Life cycle comparison of a wave and tidal energy device. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 225(4), 325-337.
- Walker, S., Howell, R., Hodgson, P., & Griffin, A. (2015). Tidal energy machines: A comparative life cycle assessment study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 229(2), 124-140.

Weckert, M. (2008). Comparative life cycle assessment of CFC-replacement compounds in different technical applications (Doctoral dissertation).

Yang, X. (2013). Ocean current energy resource assesment for the united states. Ph.d. Dissertation, georgia institute of technology.

Yañez, G. (2014). Buenas Prácticas en el Uso de Sustancias Alternativas a los Hidroclorofluorocarbonos. SEMARNAT. México. Recuperado de: [http://apps2.semarnat.gob.mx:8080/sissao/archivos/Manual%20Buenas%20Practicass%20alternativas%20a%20los%20HCFC\\_%20SEMARNAT%20VF\\_20-11-2014.pdf](http://apps2.semarnat.gob.mx:8080/sissao/archivos/Manual%20Buenas%20Practicass%20alternativas%20a%20los%20HCFC_%20SEMARNAT%20VF_20-11-2014.pdf)

Yoon, J. I., Seol, S. H., Son, C. H., Jung, S. H., Kim, Y. B., Lee, H. S., ... & Moon, J. H. (2017). Analysis of the high-efficiency EP-OTEC cycle using R152a. *Renewable energy*, *105*, 366-373.

Yoon, J. I., Son, C. H., Baek, S. M., Kim, H. J., & Lee, H. S. (2014). Efficiency comparison of subcritical OTEC power cycle using various working fluids. *Heat and Mass Transfer*, *50*(7), 985-996.

Zhai, Q., Zhu, L., & Lu, S. (2018). Life Cycle Assessment of a Buoy-Rope-Drum Wave Energy Converter. *Energies*, *11*(9), 2432.

# ANEXO A. CATEGORÍAS DE IMPACTO

## CAMBIO CLIMÁTICO

La comunidad científica está de acuerdo, en un rango del 90% al 100% de publicaciones, en que la tendencia del cambio climático en el siglo pasado está asociada de forma importante a las actividades humanas (Cook et al., 2016).

La metodología ReCiPe está interesada en el efecto marginal del agregado de una pequeña cantidad de CO<sub>2</sub> u otros gases de efecto invernadero. Cuenta con una aproximación simplificada basada en literatura disponible (Goedkoop, 2013).

Para la metodología a punto medio se utiliza los valores de equivalencia del reporte del IPCC 2007, que son calculados de acuerdo a la siguiente formula:

$$GWP_{x,T} = \frac{\int_0^T a_x \times [x(t)] dt}{\int_0^T a_r \times [r(t)] dt}$$

Donde  $GWP_{x,T}$  se refiere al potencial de calentamiento global de una sustancia  $x$  para un horizonte de tiempo  $T$ . La eficiencia radiativa asociada a un incremento unitario en la abundancia atmosférica de una sustancia  $x$  está representada por  $a_x$ , y  $a_r$  para la sustancia de referencia.  $[x(t)]$  y  $[r(t)]$  se refieren a la abundancia dependiente del tiempo para una sustancia  $x$  y para la sustancia de referencia. La sustancia de referencia utilizada es el CO<sub>2</sub>. De esta forma es posible la comparación de diferentes gases de efecto invernadero para determinar para un tiempo determinado, cual causa la mayor fuerza radiativa.

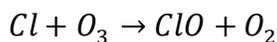
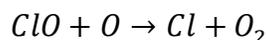
El factor de equivalencia depende del marco temporal considerado. Para sustancias con tiempos de vida comparables con la del CO<sub>2</sub>, el factor de equivalencia es relativamente insensible al marco temporal, pero es significativo para sustancias con mayor o menor tiempo de vida. Este tiempo de vida, excepto para el CO<sub>2</sub>, es determinado por la química atmosférica, mientras que la del CO<sub>2</sub> se determina principalmente por la efectividad de los sumideros de carbono (Goedkoop, 2013).

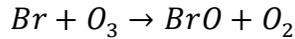
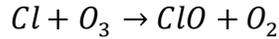
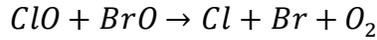
El marco temporal está determinado por las perspectivas culturales. La perspectiva Individualista usa un marco temporal de 20 años, jerárquica toma 100 años, y la igualitaria toma 500 años (Goedkoop, 2013).

## AGOTAMIENTO DE OZONO

El ozono tiene un rol único en la absorción de ciertas longitudes de onda de la luz ultravioleta proveniente del sol, cuya importancia radica en la determinación, no solo de la estructura térmica de la estratosfera, sino también el marco ecológico para la vida en la superficie terrestre. Su agotamiento asociado a clorofluorocarbonos producidos por el hombre es uno de los temas ambientales del siglo 20 (Solomon, 1999).

El factor de caracterización para el agotamiento de ozono considera la destrucción de la capa de ozono por la emisión antropogénica de sustancias agotadoras de ozono (SAO), sustancias recalcitrantes con contenido de átomos de cloro o bromo, presentes en clorofluorocarbonos y halones. Los átomos de estas sustancias, al ser liberados, pueden destruir grandes cantidades de moléculas de ozono actuando como radicales libres catalíticos (WMO,2003), de la siguiente manera:





El potencial de agotamiento de Ozono (ODP, por sus siglas en inglés), se define como una medida relativa de la capacidad de agotamiento de ozono de una SAO y utiliza como referencia al triclorofluorometano (CFC-11) (Goedkoop, 2013). El potencial de agotamiento de Ozono es una medida relativa para el potencial de una sustancia para destruir la capa de ozono, y el factor de equivalencia se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta OD_j = \sum_{i \in j} \Delta m_i \cdot ODP_i(\infty)$$

La modulación de SAO para un grupo j esta expresada en kg de CFC-11 equivalentes, y denotada como  $\Delta OD_j$ .  $\Delta m_i$  representa la cantidad evitada (kg) de SAO  $i$  del grupo j desde el 2003, y  $ODP_i(\infty)$  es el factor de equivalencia de una SAO  $i$  en kg CFC-11 eq. Por kg de SAO  $i$ .

## ACIDIFICACIÓN

La deposición de sustancias inorgánicas como sulfatos, nitratos y fosfatos tiene como resultado un cambio en la acidez de la tierra. Dependiendo la manitud, esta variación puede estar fuera del rango óptimo de acides para que ciertas especies vegetales puedan vivir, generando un cambio en la ocurrencia de especies (Goedkoop and Spriensma, 1999; Hayashi et al. 2004).

Para la obtención del potencial de acidificación (AP), es necesario obtener primero la saturación base (SB), que es el grado al cual el complejo adsorción de un suelo es saturado con cationes básicos, diferentes del hidrogeno y el aluminio. Así, SB es la suma de los cationes básicos (CB en equivalentes/kg de suelo) entre el valor total de la capacidad de intercambio catiónico (CIC en equivalentes/kg de suelo). Como se observa a continuación:

$$SB = \frac{CB}{CIC} = \frac{[K] + [Ca] + [Mg] + [Na]}{[H] + [K] + [Ca] + [Mg] + [Na]}$$

A continuación, se calcula el Factor de Destino (FF, por sus siglas en inglés), que considera la persistencia ambiental de una sustancia acidificante.

$$FF_x = \frac{\sum_j (\Delta SB_j \times A_j)}{\Delta M_x}$$

Donde  $FF_x$  es el factor de destino para una sustancia x,  $\Delta SB_j$  es el diferencial de la saturación base para un suelo j,  $A_j$  es el área del suelo j,  $\Delta M_x$  es el cambio marginal de acidificación de la sustancia x.

El potencial de Acidificación Terrestre (TAP, por sus siglas en inglés) se expresa en SO<sub>2</sub> equivalente, y es independiente del área. Por lo que para calcularlo se utiliza la fórmula:

$$TAP = \frac{FF_x}{FF_{SO_2}}$$

$FF_{SO_2}$  se refiere el factor de destino asociado al dióxido de azufre.

## EUTROFIZACIÓN MARINA

La eutrofización se puede definir como el enriquecimiento de nutrientes de un ambiente (Goedkoop, 2013).

La eutrofización en estuarios y aguas costeras se asocia principalmente al aumento de población a lo largo de las líneas de costa y/o al uso de fertilizantes en la agricultura. EL aumento en la carga de nutrientes en aguas costeras conduce al incremento de la producción primaria y resulta en la entrada de materia orgánica al sedimento directamente disponible para organismos heterótrofos. Las comunidades bénticas son altamente sensibles a la eutrofización a la hipoxia (Grall et al., 2002).

La caracterización de la eutrofización en medios acuáticos en ACV típicamente considera solo los nutrientes que limitan la producción de biomasa acuática, principalmente fitoplancton y lenteja de agua (Goedkoop, 2013).

Para modelar el destino de los nutrientes asociados a la eutrofización, Potting y Hauschild (2005) utilizan el modelo CARMEN (Modelo de relación Causa efecto para el apoyo de negociaciones ambientales, por sus siglas en inglés) para calcular la fracción de las emisiones de Nitrógeno o Fosforo que alcanzan las aguas frescas y las aguas costeras. Este modelo también es utilizado por ReCiPe, y se complementa con el modelo EUTREND (Escala europea de tendencias en concentraciones atmosféricas y deposición, por sus siglas en inglés) para calcular la deposición en el suelo y en aguas costeras. Los flujos modelados por CARMEN son los observados en la Figura 72.

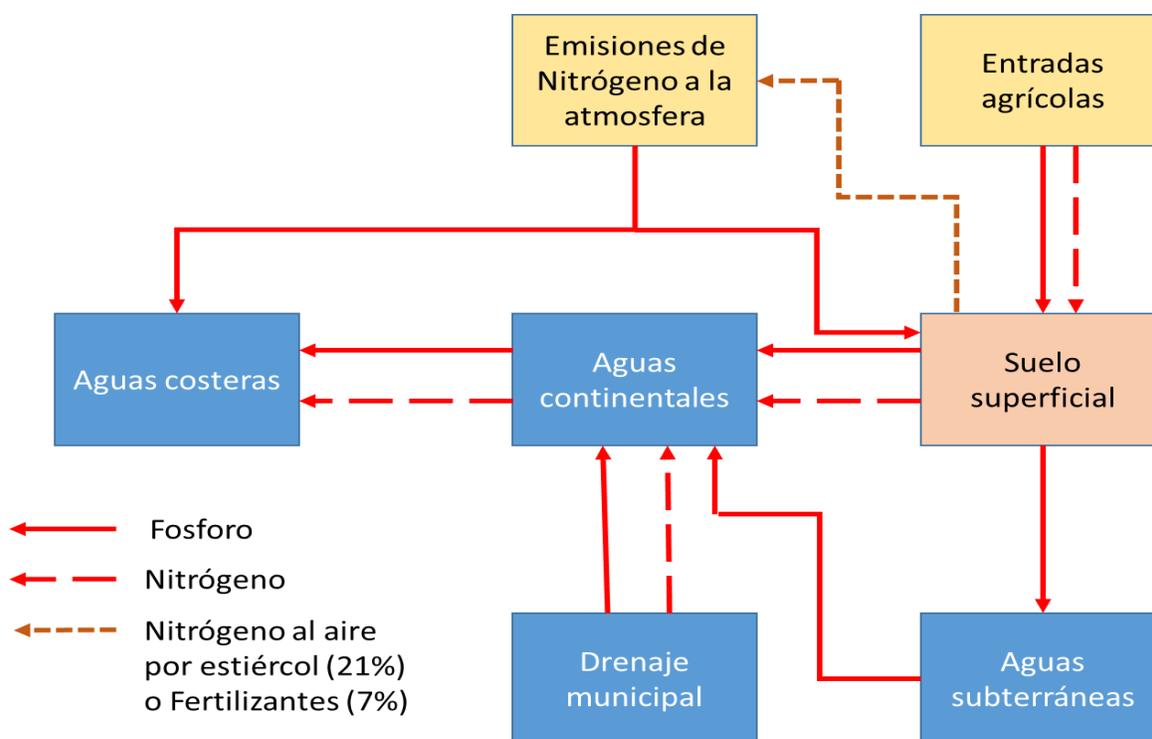


Figura 71. Rutas de emisiones y descargas utilizadas por CARMEN.

CARMEN considera que la desnitrificación en zonas anaerobias en aguas frescas es constante, con una remoción genérica del 30%, por lo que el 70% de las entradas de nitrógeno se transporta al mar. ReCiPe Asume que, para aguas costeras, el nutriente limitante es el nitrógeno, mientras que para aguas continentales es el fosforo (Goedkoop, 2013).

El factor de destino para un nutriente  $x$ ,  $FF_x$ , se obtiene de la siguiente manera

$$FF_x = \frac{dC_{x,j}}{dM_x}$$

Donde  $dC_{x,j}$  representa el incremento de concentración del nutriente  $x$  en el sistema acuático  $j$ , y  $dM_x$  el incremento marginal de la tasa de emisión del nutriente  $x$ . Esta ecuación se utiliza si se considera que el nutriente  $x$  se emite de forma directa al agua. Si se considera que el nutriente es aplicado al suelo en forma de fertilizante o excremento, se normaliza la concentración con respecto al área ocupada, la sumatoria de la concentración de un nutriente  $x$  a un mar  $j$  es ponderado por área, para mantener consistencia con los impactos de ecotoxicidad en sistemas marinos. Entonces queda la siguiente ecuación:

$$FF_x^k = \frac{\frac{1}{\sum_j A_j^k} \cdot \sum_j dC_{x,j}^k \cdot A_j^k}{\sum_i dM_{x,i}}$$

Donde  $A_j^k$  es la superficie en  $\text{km}^2$  del sistema acuático  $j$ , y el superíndice  $k$  se utiliza para diferenciar aguas continentales de aguas costeras. Mientras que el subíndice  $i$  se refiere a la categoría de la fuente.

## TOXICIDAD HUMANA Y ECOTOXICIDAD MARINA

El factor de caracterización para la toxicidad humana y la ecotoxicidad, consideran la persistencia ambiental (destino), la exposición y el efecto de una sustancia química (Goedkoop, 2013).

Los factores de destino y exposición utilizan modelos evaluativos multimedia, mientras que el factor de efectos se deriva de investigaciones sobre toxicidad en humanos y animales de laboratorio. El modelo utilizado por ReCiPe, es un modelo multimedia de destino, exposición, efecto, el USES-LCA (Sistema uniforme para la evaluación de sustancias adaptado para propósitos en ACV, por sus siglas en inglés) (Goedkoop, 2013).

El factor de destino  $F_{j,i,x}$  de la sustancia  $x$  desde el medio  $i$  y su persistencia en el medio  $j$ , se obtiene de la siguiente forma:

$$F_{j,i,x} = \frac{\partial C_{j,x}}{\partial M_{i,x}}$$

$\partial C_{j,x}$  es el cambio marginal en la concentración de una sustancia  $x$  disuelta en un medio  $j$ , y  $\partial M_{i,x}$  es el cambio marginal en la emisión de la sustancia  $x$  al medio  $i$ . Donde los medios considerados son: aire urbano, aire rural, agua, agua marina, terreno agrícola y terreno industrial. El medio utilizado para toxicidad humana el aire urbano, y para ecotoxicidad marina el medio es agua marina (Goedkoop, 2013).

La sustancia química 1,4-diclorobenceno es la sustancia de referencia utilizada para el potencial a punto medio para toxicidad humana (Goedkoop, 2013).

## FORMACIÓN DE MATERIA PARTICULADA

La materia fina particulada con diámetro inferior a  $10 \mu\text{m}$  (PM10), representa una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas. Las PM10 se asocian a problemas de salud respiratorios (Goedkoop, 2013).

El factor de destino para las PM10 se obtiene de la siguiente manera:

$$IF_{pop,x,i} = \frac{dI_{pop,k,i}}{dM_x}$$

Donde  $IF_{pop,x,i}$  es el factor de consumo de un contaminante x para una población pop, en una celda i;  $dI_{pop,k,i}$  es el incremento marginal en el radio de consumo de un contaminante k para una población pop en una celda i (Por ejemplo, el crecimiento marginal del consumo de PM10); Y  $dM_x$  es el incremento marginal de la emisión de una sustancia x (por ejemplo, el incremento marginal de emisión de SO<sub>2</sub>) (Van Zelm et al., 2008).

El potencial de formación de materia particulada PFMP se obtiene del cociente del factor de destino de un contaminante x ( $iF_x$ ), entre el factor de destino de las PM10 ( $iF_{PM10}$ ), de la siguiente forma:

$$PFMP = \frac{iF_x}{iF_{PM10}}$$

## AGOTAMIENTO DE RECURSOS MINERALES

Los minerales son extraídos de depósitos en minas, y la mayoría de los depósitos contienen diferentes minerales (Verhoef et al., 2004). Eventualmente, estos minerales son la salida económica de una operación minera, por lo que son llamados mercancía. Un mineral puede ser encontrado en diferentes depósitos.

Al explotar un depósito, primero se extraen los recursos de mejor calidad, dejando para futuras extracciones los recursos de menor calidad. Estas siguientes extracciones significan un esfuerzo extra para la explotación de los recursos minerales sobrantes. El potencial de agotamiento de recursos minerales está asociada al esfuerzo extra de la extracción por kg de mineral extraído, como resultado de la disminución del nivel del mineral (Pinto, 2018).

Se analiza la extracción de minerales de depósitos naturales mediante el aumento de los costos de extracción del producto. El factor de caracterización por extracción, asociado a la masa es el siguiente:

$$CF_{kg} = \frac{\Delta C_{kg}}{\Delta Y_{kg}} \times P_{kg} \times VPN_T$$

Donde  $\Delta C_{kg}$  es el incremento del costo en kg;  $\Delta Y_{kg}$  es la cantidad de material extraído que genera el incremento de costo;  $P_{kg}$  es la cantidad producida de recurso en kg; y  $VPN_T$  es el valor presente neto para un tiempo T.

El factor de caracterización a punto medio se compone de la siguiente forma:

$$CF_{c.kg.mid} = -\frac{\overline{M}_c}{(C_c)^2} \times V_c^2 \times P_{c.kg}$$

Donde  $CF_{c.kg.mid}$  es el factor de caracterización a punto medio para una mercancía c en kg,  $M_c$  es la pendiente del nivel recalculado de la mercancía c,  $C_c$  es la constante del nivel recalculado de la mercancía c;  $V_c^2$  es el valor en el mercado de la mercancía c al cuadrado; y  $P_{c.kg}$  es la producción de la mercancía c en kg.

Como otros factores de caracterización los valores son presentados con base a una sustancia de referencia, en este caso es el hierro (Fe).

## AGOTAMIENTO DE COMBUSTIBLES FÓSILES

Los combustibles fósiles están referidos como un grupo de recursos que contienen hidrocarburos, y va desde material volátil como el metano, al petróleo líquido y a materiales no volátiles como el carbón mineral (Goedkoop, 2013).

El factor de caracterización para la evaluación a punto medio del agotamiento de Combustibles fósiles, está basado en la energía contenida (valor calorífico). Tiene como referencia el petróleo crudo, como materia prima en suelo y con un contenido energético de 42 MJ por kg (Goedkoop, 2013).

$$CF_{punto\ medio,i} = \frac{CED_i}{CED_{ref}}$$

$CF_{punto\ medio,i}$  Es el factor de caracterización a punto medio para un recurso no renovable  $i$ ;  $CED_i$  es el indicador de la demanda de energía acumulativa de un recurso no renovable  $i$ ; y  $CED_{ref}$  el indicador de demanda de energía acumulativa del petróleo de referencia.

# ANEXO B. RESULTADOS

## VALORES DEL MIX ELECTRICO MEXICANO

Tabla 30. Valores para el mix electrico mexicano, obtenido de la base de datos Ecoinvent3.4

MX: electricity, high voltage, production mix ecoinvent 3.4		
Categorías de impacto	Siglas	Valor
Cambio Climático [kg CO <sub>2</sub> eq.]	CC	0.511
Agotamiento de combustible [kg petróleo eq.]	ACF	0.166
Toxicidad humana [kg 1,4-DB eq.]	TH	0.408
Ecotoxicidad marina [kg 1,4-DB eq.]	ETM	0.0438
Eutrofización marina [kg N eq.]	EM	0.0000959
Agotamiento de recursos minerales [kg Fe eq.]	AM	0.003
Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq.]	AO	4.08E-08
Formación de materia particulada [kg PM10 eq.]	FMP	0.00132
Acidificación [kg SO <sub>2</sub> eq.]	A	0.00199

## RESULTADOS SISTEMA OTEC CC

Tabla 31. Resultados para el sistema OTEC CC con amoniaco en la etapa de construcción.

OTEC CC Amoniaco										
Categoría	Total	Etapa								
		Construcción								
		Total	Almacenamiento /generación	Anclaje	Cable	Estructura	Bombas	Intercambiadores de calor	Tubería de agua caliente	Tubería de agua fría

Cambio Climático [kg CO <sub>2</sub> eq./kWh]	0.382	0.004125699	0.000202231	1.16515E-05	1.98858E-06	0.002065	3.74671E-05	0.001477484	1.04675E-05	0.000318272	1.13692E-06
Agotamiento de combustible [kg petróleo eq./kWh]	0.121	0.000980967	5.90116E-05	2.80192E-06	8.04593E-07	0.000491724	3.75354E-06	0.000320791	3.28528E-06	9.85166E-05	2.78391E-07
Toxicidad humana [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.104	0.003283424	0.000568142	9.57562E-06	4.88401E-05	0.001599149	0.000104336	0.000873514	2.12249E-06	7.68139E-05	9.31212E-07
Ecotoxicidad marina [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.00641	0.000360383	1.56613E-05	1.40582E-06	8.62152E-07	0.00019451	2.42231E-06	0.000137346	2.11373E-07	7.85952E-06	1.04712E-07
Eutrofización marina [kg N eq./kWh]	0.0000481	1.15949E-06	9.3735E-08	2.3023E-09	5.43397E-09	3.81102E-07	1.30369E-08	4.16242E-07	8.20646E-09	2.39136E-07	2.98557E-10
Agotamiento de metales [kg Fe eq./kWh]	0.0215	0.003144986	0.000147944	2.20959E-05	9.03759E-06	0.002916047	2.23054E-05	2.60419E-05	4.65194E-08	1.46028E-06	7.6676E-09
Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq./kWh]	3.65E-08	2.66883E-10	1.29314E-11	5.59473E-13	8.64217E-14	1.15005E-10	7.41618E-11	5.7695E-11	1.9074E-13	6.20911E-12	4.40882E-14
Formación de materia particulada [kg PM10 eq./kWh]	0.000591	1.36193E-05	8.39798E-07	6.15266E-08	2.78556E-08	8.73989E-06	8.24887E-08	3.41099E-06	1.39466E-08	4.40409E-07	2.44799E-09
Acidificación terrestre [kg SO <sub>2</sub> eq./kWh]	0.00141	1.96132E-05	1.85273E-06	5.91975E-08	8.92393E-08	9.14174E-06	2.11898E-07	7.10703E-06	3.56487E-08	1.11033E-06	5.37909E-09

Tabla 32. Resultados para el dispositivo OTEC CC con amoniaco en su etapa de generación.

OTEC CC Amoniaco				
Categoría	Etapa			
	Generación			
	Total	Emisión por bombeo	Amoniaco	Nitrogeno
Cambio Climático [kg CO <sub>2</sub> eq./kWh]	0.227	0.01725594	0.207843436	0.001900624
Agotamiento de combustible [kg petróleo eq./kWh]	0.0884	0	0.087926449	0.000473551
Toxicidad humana [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.0582	0	0.056016157	0.002183843
Ecotoxicidad marina [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.00366	0	0.003382004	0.000277996
Eutrofización marina [kg N eq./kWh]	0.0000249	0	2.45471E-05	3.52894E-07
Agotamiento de metales [kg Fe eq./kWh]	0.0072	0	0.007183942	1.60581E-05
Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq./kWh]	0.000000032	0	3.19299E-08	7.01021E-11
Formación de materia particulada [kg PM10 eq./kWh]	0.000255	0	0.000250044	4.95626E-06
Acidificación terrestre [kg SO <sub>2</sub> eq./kWh]	0.000665	0	0.000657407	7.59257E-06

Tabla 33. Resultados para el dispositivo OTEC CC con amoniaco en su etapa de fin de vida.

OTEC CC Amoniaco								
Categoría	Etapa							
	Fin de vida							
	Total	Tratamiento o nilón	Tratamiento del acero	Tratamiento espuma de polietileno	Concreto a disposición	Tratamiento Amoniaco	Tratamiento o Aluminio	Tratamiento o Fibra de vidrio
Cambio Climático [kg CO <sub>2</sub> eq./kWh]	0.150874301	1.96357E-10	0.00199815	0.000253025	3.01954E-06	0.003497106	0.145	0.000123

Agotamiento de combustible [kg petróleo eq./kWh]	0.031619033	0	0.000471104	5.95521E-05	3.08632E-06	0.00143739	0.0296	4.79E-05
Toxicidad humana [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.042516576	1.75788E-10	0.001754848	0.000228727	1.25271E-06	0.000760949	0.0397	7.08E-05
Ecotoxicidad marina [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.002389617	5.61886E-11	0.000238972	2.58105E-05	1.11137E-07	5.91838E-05	0.00206	5.54E-06
Eutrofización marina [kg N eq./kWh]	2.20405E-05	1.12635E-12	9.64046E-07	4.82709E-08	8.46732E-10	1.08084E-06	1.99E-05	4.65E-08
Agotamiento de metales [kg Fe eq./kWh]	0.011155014	0	3.92225E-05	1.78662E-06	1.49862E-07	0.000109355	0.011	4.50E-06
Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq./kWh]	4.23312E-09	0	9.59716E-11	1.05285E-11	1.51325E-12	6.31303E-10	3.48E-09	1.38E-11
Formación de materia particulada [kg PM10 eq./kWh]	0.000322381	4.69761E-15	4.25054E-06	5.7342E-07	8.89139E-09	1.23498E-05	0.000305	1.98E-07
Acidificación terrestre [kg SO <sub>2</sub> eq./kWh]	0.000725387	1.55405E-14	8.51877E-06	1.24334E-06	2.13816E-08	3.61923E-05	0.000679	4.11E-07

## RESULTADOS DEL HIDROGENERADOR IMPULSA

Tabla 34. Resultados del hidrogenerador IMPULSA en la etapa de construcción.

Corrientes marinas. Hidrogenerador IMPULSA							
Categoría	Total	Etapa					
		Construcción					
		Total	Alabes	Anclaje	Carcasa	Rotor	Tensor
Cambio Climático [kg CO <sub>2</sub> eq./kWh]	0.411	0.12883209	0.098207507	0.003244196	0.005874278	0.021498496	7.61355E-06
Agotamiento de combustible [kg petróleo eq./kWh]	0.0869	0.029305348	0.022000265	0.00045279	0.001683313	0.005167447	1.53373E-06
Toxicidad humana [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.249	0.235373907	0.20854619	0.000858654	0.00828797	0.017675511	5.58157E-06
Ecotoxicidad marina [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.0165	0.0160431	0.012915772	7.0099E-05	0.000460456	0.002596123	6.51045E-07

Eutrofización marina [kg N eq./kWh]	0.0000612	3.81191E-05	3.19474E-05	4.09831E-07	1.51527E-06	4.24408E-06	2.50742E-09
Agotamiento de metales [kg Fe eq./kWh]	0.277	0.081074471	0.039737156	7.45064E-05	0.000416871	0.040844582	1.35527E-06
Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq./kWh]	7.46E-09	6.54536E-09	4.93835E-09	1.62305E-10	4.12563E-10	1.03161E-09	5.29451E-13
Formación de materia particulada [kg PM10 eq./kWh]	0.000668	0.000407199	0.000274461	3.7219E-06	1.53484E-05	0.000113651	1.66601E-08
Acidificación terrestre [kg SO <sub>2</sub> eq./kWh]	0.00143	0.000790691	0.000639467	7.55753E-06	3.43396E-05	0.000109301	2.49172E-08

**Tabla 35. Resultados del Hidrogenerador IMPULSA en su etapa de fin de vida.**

Corrientes marinas. Hidrogenerador IMPULSA				
Categoría	Etapa			
	Fin de vida			
	Total	Tratamiento del acero	Disposición de concreto	Tratamiento Fibra de vidrio
Cambio Climático [kg CO <sub>2</sub> eq./kWh]	0.28216791	0.274007885	2.4978E-08	0.00816
Agotamiento de combustible [kg petróleo eq./kWh]	0.057594652	0.054424626	2.55304E-08	0.00317
Toxicidad humana [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.013626093	0.008936083	1.03625E-08	0.00469
Ecotoxicidad marina [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.0004569	8.98989E-05	9.1934E-10	0.000367
Eutrofización marina [kg N eq./kWh]	2.30809E-05	2.00009E-05	7.00427E-12	0.00000308
Agotamiento de metales [kg Fe eq./kWh]	0.195925529	0.195627528	1.23968E-09	0.000298
Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq./kWh]	9.14643E-10	6.30092E-13	1.25178E-14	9.14E-10
Formación de materia particulada [kg PM10 eq./kWh]	0.000260801	0.000247701	7.35507E-11	0.0000131

Acidificación terrestre [kg SO <sub>2</sub> eq./kWh]	0.000639309	0.000612109	1.76871E-10	0.0000272
--	-------------	-------------	-------------	-----------

## RESULTADOS DEL GENERADOR SEAGEN

Tabla 36. Resultados del generador SeaGen en su etapa de construcción.

Corrientes de marea SeaGen								
Categoría	Total	Etapa						
		Construcción						
		Total	Cableado	Cruz	Cuchilla	Interconexión	Top	Torre
Cambio Climático [kg CO <sub>2</sub> eq./kWh]	0.007834451	0.003038377	4.28937E-05	0.000244332	3.40485E-05	4.41492E-05	0.001191716	0.001481238
Agotamiento de combustible [kg petróleo eq./kWh]	0.001935347	0.000804145	1.03375E-05	6.32208E-05	8.10583E-06	1.07686E-05	0.000283712	0.000428
Toxicidad humana [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.010965765	0.006755015	0.002902499	0.000135434	1.42305E-05	0.001794165	0.000498078	0.001410609
Ecotoxicidad marina [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.000870496	0.000297579	4.58346E-05	8.58535E-06	9.16514E-07	3.05811E-05	3.20785E-05	0.000179583
Eutrofización marina [kg N eq./kWh]	3.03787E-06	7.28112E-07	1.0707E-07	4.41425E-08	5.61691E-09	6.91122E-08	1.966E-07	3.05571E-07
Agotamiento de metales [kg Fe eq./kWh]	0.003819289	0.003723499	0.000393916	0.000123641	2.10057E-05	0.000275462	0.0007352	0.002174273
Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq./kWh]	4.18795E-10	1.87488E-10	2.18373E-12	1.45202E-11	1.82373E-12	2.18805E-12	6.38313E-11	1.02941E-10
Formación de materia particulada [kg PM10 eq./kWh]	2.45217E-05	1.43146E-05	1.19763E-06	8.62267E-07	1.30692E-07	8.27125E-07	4.57425E-06	6.72261E-06
Acidificación terrestre [kg SO <sub>2</sub> eq./kWh]	4.05542E-05	2.00709E-05	3.93083E-06	1.00095E-06	1.32254E-07	2.49731E-06	4.62894E-06	7.8806E-06

Tabla 37. Resultados del generador SeaGen en su etapa de fin de vida.

Corrientes de marea SeaGen				
Categoría	Etapa			
	Fin de vida			
	Total	Tratamiento del acero	Tratamiento epoxi	Tratamiento espuma
Cambio Climático [kg CO <sub>2</sub> eq./kWh]	0.004796074	0.004782313	1.27105E-05	1.0505E-06
Agotamiento de combustible [kg petróleo eq./kWh]	0.001131202	0.001127526	3.42876E-06	2.47247E-07
Toxicidad humana [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.00421075	0.004200001	9.79903E-06	9.49623E-07
Ecotoxicidad marina [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.000572917	0.000571948	8.61766E-07	1.0716E-07
Eutrofización marina [kg N eq./kWh]	2.30975E-06	2.30732E-06	2.23526E-09	2.0041E-10
Agotamiento de metales [kg Fe eq./kWh]	9.57905E-05	9.38739E-05	6.72969E-07	7.41766E-09
Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq./kWh]	2.31307E-10	2.29696E-10	1.56801E-12	4.37121E-14
Formación de materia particulada [kg PM10 eq./kWh]	1.02072E-05	1.01731E-05	3.16792E-08	2.38071E-09
Acidificación terrestre [kg SO <sub>2</sub> eq./kWh]	2.04833E-05	2.03886E-05	8.95671E-08	5.16208E-09

## RESULTADOS DEL DISPOSITIVO DE GRADIENTE SALINO (RED)

Tabla 38. Resultados del dispositivo de gradiente salino (RED) en la etapa de construcción.

Gradiente salino RED							
Categoría	Total	Etapa					
		Construcción					
		Total	Bombas	Filtros	Membrana	Pila	Transformador
Cambio Climático [kg CO <sub>2</sub> eq./kWh]	0.347531589	0.336665256	1.26084E-06	2.21451E-06	0.335467253	0.001189034	5.49405E-06
Agotamiento de combustible [kg petróleo eq./kWh]	0.229415087	0.229128124	2.96447E-07	5.20672E-07	0.228779194	0.000346665	1.44816E-06
Toxicidad humana [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.183907989	0.14331567	5.02447E-07	8.82486E-07	0.140358208	0.002871321	8.47559E-05
Ecotoxicidad marina [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.016387244	0.010860215	3.24605E-08	5.70129E-08	0.010756102	0.000102335	1.68938E-06
Eutrofización marina [kg N eq./kWh]	0.000811981	5.21896E-05	2.05183E-10	3.60378E-10	5.16973E-05	4.81957E-07	9.70917E-09
Agotamiento de metales [kg Fe eq./kWh]	0.007852874	0.007828982	7.97797E-07	1.40123E-06	0.005582745	0.002181553	6.24854E-05
Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq./kWh]	1.64391E-08	1.63806E-08	6.64779E-14	1.1676E-13	1.63327E-08	4.70075E-11	7.59979E-13
Formación de materia particulada [kg PM10 eq./kWh]	0.000723404	0.000720688	4.89524E-09	8.59787E-09	0.000710506	1.01122E-05	5.72282E-08
Acidificación terrestre [kg SO <sub>2</sub> eq./kWh]	0.001315033	0.001309476	4.85927E-09	8.5347E-09	0.001267493	4.18088E-05	1.61563E-07

Tabla 39. Resultados del dispositivo de gradiente salino (RED) en su etapa de fin de vida.

Gradiente salino RED						
Categoría	Etapa					
	Fin de vida					
	Total	Tratamiento nilón	Tratamiento del acero	Disposición de membranas	Tratamiento silicon	Tratamiento titanio
Cambio Climático [kg CO <sub>2</sub> eq./kWh]	0.010866333	4.27636E-06	0.001217132	0.009644924	4,5E-008	3,09E-010
Agotamiento de combustible [kg petróleo eq./kWh]	0.000286963	0	0.000286963	0	4,6E-008	3,16E-010
Toxicidad humana [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.040592319	3.8284E-06	0.00106893	0.039519561	1,87E-008	1,28E-010
Ecotoxicidad marina [kg 1,4-DB eq./kWh]	0.005527029	1.22371E-06	0.000145565	0.00538024	1,66E-009	1,14E-011
Eutrofización marina [kg N eq./kWh]	0.000759791	2.45303E-08	5.87229E-07	0.000759179	1,26E-011	8,68E-014
Agotamiento de metales [kg Fe eq./kWh]	2.38916E-05	0	2.38916E-05	0	2,23E-009	1,54E-011
Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq./kWh]	5.84591E-11	0	5.84591E-11	0	2,26E-014	1,55E-016
Formación de materia particulada [kg PM10 eq./kWh]	2.71582E-06	1.02307E-10	2.58913E-06	1.26588E-07	2,26E-015	9,11E-013
Acidificación terrestre [kg SO <sub>2</sub> eq./kWh]	5.55612E-06	3.3845E-10	5.18903E-06	3.66754E-07	2,26E-017	2,19E-012