



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

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLE Y CONVENCIONAL**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

I.Q. SANDRA PINTO PÉREZ

**TUTOR PRINCIPAL**

DRA. LEONOR PATRICIA GÜERECÁ HERNÁNDEZ  
INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM

**COMITÉ TUTOR**

DRA. IDANIA VALDEZ VAZQUEZ  
INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM- UNIDAD ACADÉMICA JURQUILLA

DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ,  
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, CDMX, DICIEMBRE 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

JURADO ASIGNADO:

**PRESIDENTE:** Dr. Santoyo Castelazo Edgar

**SECRETARIO:** Dr. César Valdéz Enrique

**VOCAL:** Dr. Silva Casarin Rodolfo

**1 ER. SUPLENTE:** Dra. Valdez Vázquez Idania

**2 D O. SUPLENTE:** Dra. Güereca Hernández Leonor P.

**LUGAR O LUGARES** donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería de la UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dra. Leonor Patricia Güereca Hernández

-----  
FIRMA

*Dedicada a*

*Erick, gracias por tu amor y apoyo infinito durante esta etapa, que sin duda haces que todo sea más fácil, sigamos caminando juntos. Te amo.*

*Mi madre, por siempre apoyarme y dar los consejos más certeros en el momento justo, pero sobre todo por su gran amor.*

*Mis hermanos, por brindarme su amor y apoyo incondicional.*

*Mis sobrinos, siempre iluminando mi vida con sus sonrisas.*

*A Dios, por permitirme llegar hasta aquí y llenar de bendiciones mi vida.*

## Agradecimientos

A la Dra. Leonor Patricia Güereca Hernández, por aceptarme en su grupo de trabajo y por el gran apoyo durante el desarrollo de este proyecto, que sin el esto no sería posible.

A mis compañeros y amigos que obtuve durante la maestría, Verito, Eunice, Héctor y Dora que hicieron de ella una estancia mejor.

A mis amigos que durante esta etapa siempre estuvieron apoyándome, Alejandro, Aarón y Daryl.

A mi comité tutor, la Dra. Idania Valdez y al Dr. Enrique César Valdez por los aportes a mi trabajo durante cada tutorial.

A mi comité ampliado Dr. Rodolfo Silva y el Dr. Edgar Santoyo, por los grandes consejos para enriquecer mi trabajo.

A los proyectos CEMIE-OCEANO y CEMIE-BIO, por proporcionar la información necesaria para poder realizar este proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado.

Agradezco a la UNAM, la máxima casa de estudios de México por la formación brindada durante mis estudios de maestría, institución que siempre me identificara en cualquier lugar que me encuentre-

“Por mi raza hablará el espíritu”.

# Índice

Índice de tablas .....	vii
Índice de figuras .....	ix
RESUMEN .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1 INTRODUCCIÓN .....	13
1.1 Justificación .....	14
1.2 Objetivos .....	15
1.2.1 Objetivo general .....	15
1.2.2 Objetivos específicos .....	15
2 MARCO TEORICO .....	16
2.1 ¿Qué son las energías renovables? .....	16
2.2 Panorama mundial de energías renovables .....	18
2.3 Escenario de las energías renovables en México .....	20
2.4 Tecnologías de generación de energía convencional .....	26
2.5 Generación de energía eléctrica por fuentes renovables .....	28
2.6 Energías del océano .....	29
2.7 Energía a partir de biomasa .....	31
2.8 Análisis de Ciclo de Vida .....	35
2.8.1 Etapas de ACV .....	35
2.8.2 Antecedentes del ACV .....	38
2.9 ACV-Energías de Océano .....	39
2.10 ACV-Energías a partir de Biomasa .....	39
3 METODOLOGÍA .....	41
3.1 Definición de objetivos y alcance .....	41
3.1.1 Objetivo del ACV comparativo en la generación de energía .....	41
3.1.2 Alcances .....	41
3.2 Límites del sistema .....	42
3.3 Unidad funcional .....	44
3.4 Descripción del sistema .....	44
3.5 Metodología para la Evaluación del Impacto .....	47

3.5.1	Elección de categorías de impacto e indicadores .....	47
3.5.2	Software utilizado .....	48
3.5.3	Calidad y recolección de los datos. ....	48
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	50
4.1	Inventario de ciclo de vida .....	50
4.1.1	Inventario de Energía Undimotriz .....	50
4.1.2	Inventario de Energía de Biomasa.....	57
4.1.3	Inventario Energía convencional.....	59
4.2	Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida.....	60
4.2.1	Impacto Global Impacto global Caracterizado .....	60
4.2.2	Cambio Climático .....	68
4.2.3	Disminución de la Capa de Ozono.....	71
4.2.4	Toxicidad Humana.....	74
4.2.5	Acidificación Terrestre .....	77
4.2.6	Eutrofización de Agua Dulce .....	80
4.2.7	Formación de Oxidantes Fotoquímicos.....	83
4.2.8	Agotamiento de Agua.....	86
4.2.9	Agotamiento de Recursos Minerales .....	89
4.2.10	Agotamiento de Combustibles Fósiles .....	92
4.2.11	Análisis de sensibilidad.....	95
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	98
5.1	Conclusiones.....	98
5.2	Recomendaciones .....	99
6	REFERENCIAS.....	100
	ANEXOS .....	107

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las Energías Renovables.....	17
Tabla 2. Leyes vinculadas con las energías renovables.....	22
Tabla 3. Instrumentos jurídicos en materia de Energías Renovables .....	22
Tabla 4. Centros Mexicanos de Innovación en Energía.....	24
Tabla 5. Instrumentos de planeación y política .....	25
Tabla 6. Clasificación de dispositivos undimotrices .....	30
Tabla 7. Ventas y desventajas del uso de biomasa como fuente de generación de energía.....	35
Tabla 8. Cronología del desarrollo del Análisis del Ciclo de Vida.....	38
Tabla 9. Escenarios estudiados. ....	45
Tabla 10. Categorías de Impacto elegidas para el ACV de la generación de energía eléctrica.....	48
Tabla 11. Estructuras y material considerados en la etapa de “Extracción de Materia Prima y Construcción” .....	50
Tabla 12. Datos de Inventario para la etapa de EMP.....	52
Tabla 13. Datos de inventario para la etapa de generación. ....	56
Tabla 14. Datos de inventario para la etapa de almacenamiento. ....	56
Tabla 15. Datos de inventario para la etapa de desmantelamiento. ....	57
Tabla 16. Datos de Inventario para la etapa de extracción de materias primas (proceso de siembra y cosecha).....	57
Tabla 17. Datos de inventario para etapa de EMP.....	58
Tabla 18. Datos de inventario para la etapa de construcción.....	58
Tabla 19. Datos de inventario (entradas) para la etapa de generación.....	59
Tabla 20. Datos de inventario (Salidas) para la etapa de generación.....	59
Tabla 21. Etapas del Ciclo de Vida para cada energía analizada. ....	60
Tabla 22. Impactos generados y evitados de cada uno de los sistemas analizados. ....	61
Tabla 23. Clasificación de las Energías Renovables.....	63
Tabla 24. Contribuciones a la categoría de cambio climático, valores totales por escenario para los sistemas de energía undimotriz. ....	68
Tabla 25. Contribuciones a la categoría de Capa de Ozono, valores totales por escenario para los sistemas de energía undimotriz. ....	71
Tabla 26. Contribuciones a la categoría de Toxicidad Humana, valores totales por escenario para los sistemas de energía undimotriz.....	74
Tabla 27. Contribuciones a la categoría de Acidificación Terrestre, valores totales por escenario de energía undimotriz.....	77
Tabla 28. Contribuciones a la categoría de Eutrofización de Agua Dulce, valores totales por escenario de energía undimotriz .....	80
Tabla 29. Contribuciones a la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos, valores totales por escenario de energía undimotriz. ....	83
Tabla 30. Contribuciones a la categoría de Agotamiento de Agua, valores totales por escenario de energía undimotriz. ....	86



Tabla 31. Contribuciones a la categoría de Agotamiento de recursos minerales, valores totales por escenario de energía undimotriz. ....	89
Tabla 32. Contribuciones a la categoría de Agotamiento de combustibles fósiles, valores totales por escenario de energía undimotriz. ....	92
Tabla 33. Ventajas y desventajas de una central hidroeléctrica. ....	108
Tabla 34. Ventajas y desventajas de los usos de energía eólica. ....	110
Tabla 35. Ventajas y desventajas de la energía solar. ....	111
Tabla 36. Categorías de impacto a nivel punto final. ....	113
Tabla 37. Potenciales de Calentamiento Global relacionados con el CO2. ....	115

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Generación eléctrica mundial .....	19
Figura 2. Número de países con políticas de energía renovable, por tipo 2011-2015 .....	20
Figura 3. División del mercado eléctrico.....	21
Figura 4. Fuentes de energía y tipo de energía obtenida .....	28
Figura 5. Tipos de biomasa.....	32
Figura 6. Esquema de una planta de generación de energía mediante el uso de biomasa.....	34
Figura 7. Fases de un Análisis de Ciclo de Vida. Fuente: ISO 14040.....	36
Figura 8. Metodología del ACV.....	41
Figura 9. Límites del sistema de la producción de energía eléctrica en una central undimotriz.....	42
Figura 10. Límites del sistema de la producción de energía eléctrica a partir de biomasa. ....	43
Figura 11. Límites del sistema de la producción de energía eléctrica en una central termoeléctrica convencional .....	43
Figura 12. Escenarios de energía undimotriz bajo estudio .....	46
Figura 13. Gráfica que muestra los impactos ambientales generados y evitados, para cada uno de los sistemas analizados, en las categorías de Cambio climático.....	62
Figura 14. Gráfica que muestra los impactos ambientales generados y evitados, para cada uno de los sistemas analizados, en las categorías de Agotamiento de la capa de ozono, Acidificación terrestre, Eutrofización de agua dulce, Toxicidad humana. ....	64
Figura 15. Gráficas que muestran los impactos ambientales generados y evitados, para cada uno de los sistemas analizados, en las categorías de Agotamiento de la capa de ozono, Acidificación terrestre, Eutrofización de agua dulce, Toxicidad humana. ....	65
Figura 16. . Gráficas que muestran los impactos ambientales generados y evitados, para cada uno de los sistemas analizados. La figura presenta valores normalizados con respecto al mayor impacto generado .....	67
Figura 17. Porcentajes de aportación por proceso para cada escenario para la categoría de Cambio Climático.....	69
Figura 18. Contribuciones a la categoría de Cambio Climático por etapa del sistema bio.....	70
Figura 19. Porcentajes de aportación por proceso para cada escenario para la categoría de Disminución de la Capa de Ozono.....	72
Figura 20. Contribuciones a la categoría de Disminución de la Capa de Ozono .....	73
Figura 21. Porcentajes de aportación por proceso para cada escenario para la categoría de Toxicidad Humana.....	75
Figura 22. Contribuciones a la categoría de Toxicidad Humana por etapa del sistema bio. ....	76
Figura 23. Porcentajes de aportación por proceso para cada escenario en la categoría de Acidificación Terrestre. ....	78
Figura 24. Contribución a la categoría de Acidificación Terrestre por etapa del sistema bio .....	79
Figura 25. Porcentaje de aportación por proceso para cada uno de los sistemas para la categoría de Eutrofización de Agua Dulce .....	81
Figura 26. Contribuciones a la categoría de Eutrofización de Agua Dulce por etapa del sistema bio. ....	82

Figura 27. Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario para la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos.....	84
Figura 28. Contribuciones a la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos por etapa del sistema bio. ....	85
Figura 29. Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario para la categoría de Agotamiento de Agua. ....	87
Figura 30. Contribuciones a la categoría de Agotamiento de Agua pro etapa del sistema bio.....	88
Figura 31. Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario para la categoría de Agotamiento de Recursos Minerales .....	90
Figura 32. . Contribuciones a la categoría de Agotamiento de Recurso Minerales por etapa del sistema bio .....	91
Figura 33. Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario para la categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles .....	93
Figura 34. Contribuciones a la categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles por etapa del sistema bio. ....	94
Figura 35. Impacto ambientales caracterizados del sistema bio considerando un reparto másico.	95
Figura 36. Impacto ambientales caracterizados del sistema bio considerando un reparto económico.....	96
Figura 37. Esquema de una planta hidroeléctrica.....	108
Figura 38. Partes que contribuyen a un aerogenerador .....	109
Figura 39. Centra solar .....	111

## RESUMEN

El aumento de gases de efecto invernadero generados por la quema de combustibles fósiles, ha sido reconocido como uno de los principales causantes del calentamiento global. Países de todo el mundo han estado desarrollando nuevas políticas en un intento de preservar su seguridad energética nacional al mismo tiempo que buscan mitigar emisiones generadoras de cambio climático. Las políticas emergentes son en su mayoría tendientes a utilizar más las energías renovables en el futuro, por lo que las carteras de suministro de energía ideales futuras incluyen una combinación de ambos, combustibles fósiles y energías renovables (Hadian and Madani, 2015). Sin embargo, el uso de fuentes renovables no necesariamente implica que no se afectará de manera negativa al planeta.

Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta aceptada internacionalmente que permite de forma integral la evaluación cuantitativa y sistemática de los aspectos ambientales de un producto o sistema a lo largo de su ciclo de vida, además de poder comparar los impactos de productos/servicios que tengan una función o desempeño equivalente, permitiendo a los tomadores de decisiones seleccionar productos/servicios menos dañinos al ambiente, estableciendo un criterio general para que los productores puedan brindar productos/servicios que generen menos impactos ambientales (Padilla, 2015).

El objetivo de esta tesis fue realizar una Evaluación de Análisis de Ciclo de Vida para generación de energía eléctrica para sistemas renovables, específicamente de energía undimotriz y energía a partir de biomasa, con ello identificar el medio de generación de energía eléctrica que genere menores impactos ambientales, así como proporcionar datos de inventario para futuros estudios enfocados a ACV y energías renovables para nuestro país.

Se definió como unidad funcional 1kWh de energía eléctrica generada con lo cual, se logró integrar un Inventario de Ciclo de Vida (ICV) para energía undimotriz y energía a partir de biomasa.

Finalmente se identificaron las etapas críticas de los sistemas evaluados, así como las áreas de oportunidad para los desarrolladores de energía renovables.

## ABSTRACT

The increase of greenhouse gases generated by the burning of fossil fuels has been recognized as one of the main causes of global warming. Countries around the world have been developed new policies in attempt to preserve their national energy security at the same time that they seek to mitigate emissions that generate climate change. Emerging policies are more likely to use renewable energy in the future, so energy supply portfolios for future nations include a combination of both, fossil fuels and renewable energy (Hadian and Madani, 2015). However, the use of renewable sources does not necessarily mean that the planet will not be negatively affected.

Life Cycle Analysis (LCA) is an internationally accepted tool that comprehensively allows the quantitative and systematic evaluation of the environmental aspects of a product or system throughout its life cycle, as well as being able to compare the impacts of services or products that have an equivalent function or performance, allowing decision makers to select options that are less harmful to the environment, establishing a general criterion so producers can provide a product/service that generate less environmental impacts (Padilla, 2015).

The objective of this thesis was to carry out an Evaluation of Life Cycle Analysis for generation of electrical energy for renewable systems, specifically of wave energy and energy from biomass to identify the way of generating electric power that generates less environmental impacts, as well as providing inventory data for future studies focused on LCA and renewable energies in our country.

One kilowatt-hour (1 kWh) was defined as functional unit of electric power generation, with this; it was possible to integrate an Inventory of Life Cycle (ILC) for wave energy and energy from biomass.

Finally, the critical stages of the systems evaluated were identified, as well as the areas of opportunity for renewable energy developers.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles convencionales, como el petróleo, el carbón y el gas natural, han sido las principales fuentes de producción de energía en todo el mundo. El mix eléctrico en la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) en 2014 se mantuvo dominado por los combustibles fósiles con un 59%, principalmente carbón y gas con un 32% y 24% respectivamente (Coxtinica, 2015), (International Energy Agency, 2015); reafirmando la gran dependencia que aún se tiene por los combustibles fósiles, los cuales emiten gases de efecto invernadero (como CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>) al entrar en combustión y liberar su energía, los combustibles fósiles son causantes del calentamiento global. Aunado a lo anterior, su extracción es cada vez más difícil y la disponibilidad de reservas de estos combustibles fósiles es más escasa.

El aumento de gases de efecto invernadero generados por la quema de combustibles fósiles, ha sido reconocido como uno de los principales causantes del calentamiento global, que ha traído como consecuencia el derretimiento de los glaciares, el incremento del nivel del mar, acidificación de los océanos, cambio de los patrones climáticos y como consecuencia cambios en los ecosistemas. Países de todo el mundo han estado desarrollando nuevas políticas en un intento de preservar su seguridad energética nacional al mismo tiempo que buscan mitigar emisiones generadoras de cambio climático. Las políticas emergentes son en su mayoría tendientes a utilizar más las energías renovables en el futuro, por lo que las carteras de suministro de energía ideales futuras incluyen una combinación de ambos, combustibles fósiles y energías renovables (Hadian and Madani, 2015). Sin embargo el uso de fuentes renovables no necesariamente implica que no se afectará de manera negativa al planeta.

La mitigación del cambio climático a través del uso de las energías renovables también puede tener impactos ambientales negativos. Centrándose únicamente en las emisiones de gases de efecto invernadero puede conducir a la supervisión de otros impactos ambientales. La huella de carbono de un producto a menudo no se correlaciona bien con otras categorías de impacto, debido a los diferentes orígenes de los impactos a lo largo del ciclo de vida del producto. Con el fin de asegurar la mitigación del cambio climático mediante la mejora de la producción de energía renovable, es importante evaluar su impacto ambiental integral, teniendo en cuenta todas las categorías de impacto pertinentes (Sokka, et al, 2016).

Por otra parte Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que permite de forma integral la evaluación cuantitativa y sistemática de los aspectos ambientales de un producto o sistema a lo largo de su ciclo de vida. El ACV valora todas las entradas y salidas de las sustancias, e investiga los impactos ambientales de principio a fin a lo largo del ciclo de vida completo, desde la exploración y el suministro de materiales y combustibles, la producción y el funcionamiento del objeto estudiado, a su eliminación y/o reciclaje (Pehnt, 2006). Tal conocimiento permite valorar el riesgo de simplemente trasladar la contaminación de un medio ambiental a otro. El ACV principalmente se ha aplicado para evaluar los impactos del ciclo de vida de los productos, pero también puede ser utilizado para la evaluación de servicios, tecnologías o regiones.

## 1.1 Justificación

Hoy en día el consumo de energía eléctrica es una necesidad indispensable en el mundo. La importancia de la electricidad radica en que es una de las principales formas de energía usadas para mantener los estilos de vida de la sociedad actual. Las comunicaciones, el transporte, el abastecimiento de alimentos, y la mayor parte de los servicios de los hogares, oficinas y fábricas dependen de un suministro confiable de energía eléctrica (Reyes, 2015).

Las preocupaciones de seguridad energética y la necesidad de mitigación de los impactos ambientales, asociados con la generación de energía a partir de combustibles fósiles por ejemplo, las emisiones de gases de efecto invernadero, han propiciado la creciente introducción de combustibles renovables al mercado energético.

A nivel mundial en este marco, el sector eléctrico tiene un compromiso claro: la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI). Ante esto, las políticas de todos los países deben impulsar una transición energética hacia un sector sustentable, eficiente y menos dependiente de los combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica (SENER, 2015).

Las bondades económicas de las fuentes renovables de energía han tenido mayor relevancia, pues permiten amortiguar el riesgo asociado a la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles, reducir impactos ambientales, pero sobre todo impulsar el desarrollo sustentable (SENER, 2013).

México requiere energía eléctrica de calidad, homologable a la de países desarrollados, es decir, que su costo y fiabilidad sean competitivos pero con un bajo costo ambiental. Actualmente el mercado eléctrico no involucra los costos asociados a los daños ambientales.

Con base en lo anterior para evaluar la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables, es necesaria la implementación de una metodología capaz de evaluar de manera sólida alternativas en la generación de energía eléctrica.

El ACV es una metodología estandarizada por ISO 14044 (ISO, 2006), aceptada y reconocida a nivel mundial, que motiva el desarrollo de una producción sustentable y ambientalmente responsable, también ofrece conocer y fortalecer el proceso de producción, de tal forma que permite cuantificar un indicador agregado como una unidad de medida ambiental, con lo cual es posible evaluar los impactos ambientales del producto o servicio que es sometido a este análisis.

De esta manera el ACV se convierte en una herramienta, la cual permite identificar los puntos más críticos del ciclo de vida de un producto/servicio para conseguir mejoras ambientales, además de poder comparar los impactos de productos/servicios que tengan una función o desempeño equivalente, permitiendo a los tomadores de decisiones seleccionar productos/servicios menos dañinos al ambiente, estableciendo un criterio general para que los productores puedan fabricar productos/servicios que generen menos impactos ambientales (Padilla, 2015).

A nivel mundial existen estudios de ACV para diversas energías renovables, entre ellas la producción de biogás, de biodiesel y energía eólica (Collet et al., 2010; Poeschl et al, 2011; Rehl, 2011; Chen et al., 2012; Hahn et al., 2014; Jin et al., 2015), sin embargo, en México existen pocos estudios de ACV para energías renovables (Centro Mario Molina, 2013; Morales, 2015) los cuales no son suficientes para evaluar la situación en particular del país respecto a este tipo de energías comparadas con las formas convencionales de producción de energía.

En virtud de los argumentos antes expuesto, con este trabajo se busca conocer cuál es el medio de generación de energía eléctrica que genere menores impactos ambientales, así como proporcionar datos de inventario para futuros estudios enfocados a ACV y energías renovables para nuestro país.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Desarrollar un Análisis de Ciclo de Vida comparativo de la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovable y convencional en México, para identificar las etapas con mayores contribuciones ambientales y proponer mejoras ambientales.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Determinar los impactos ambientales de las tecnologías de producción de energía eléctrica en México mediante ACV.
- Desarrollar un inventario de ciclo de vida para el sector energía en México a partir de balances de masa y energía de los sistemas de generación de energía a partir de fuentes renovables y de manera convencional.



## 2 MARCO TEORICO

En este capítulo se describe a las energías renovables y se muestra su estado actual a nivel nacional e internacional. Se describe la metodología de Análisis de Ciclo de Vida de acuerdo a la Norma ISO 14044 (ISO, 2006) y se analizan estudios de ciclo de vida realizados para evaluar energías renovables, con la finalidad de proporcionar un contexto acerca de las energías renovables y ACV a nivel mundial.

### 2.1 ¿Qué son las energías renovables?

El término de energías renovables, se refiere a aquellas cuya fuente son fenómenos, flujos y ciclos implícitos de la naturaleza y los procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, que se regeneran naturalmente y que son virtualmente inagotables, por lo que su disponibilidad no será interrumpida durante el tiempo de vida de una persona, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o que pueden renovarse de manera natural; se distribuyen en amplias y variadas zonas, su aprovechamiento es técnicamente viable y que idealmente no causan afectaciones al ambiente.

En la literatura técnica existen variadas definiciones de energía renovable, dentro de las cuales tenemos las siguientes:

Twidel y Weir (2006) definen a las energías renovables como: “la energías obtenida de las continuas o repetitivas corrientes de energía que se producen en el medio ambiente natural”.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC)-Grupo Técnico III (2007) define a las energías renovables como: “La energía que se obtiene de las corrientes continuas que ocurren en el medio natural, e incluye tecnologías que no son de carbono, como la energía solar, la energía hidráulica, eólica, de mareas y las olas y el calor geotérmico, así como carbono –tecnologías neutras, como la biomasa.

Energía renovable es aquella que se puede aprovechar ilimitadamente, permaneciendo inalterable en cuanto a su cantidad, como son la energía del Sol, del viento, del interior de la Tierra y el movimiento del agua (Coxtinica, 2015)

Las fuentes de energía renovables son aquellas que por su cantidad, en relación con los consumos que los seres humanos pueden hacer de ellas, son virtualmente inagotables, y su propio consumo no afecta el medio ambiente (Estrada y Arancibia, 2010).

Por otro lado, la Asociación de Industrias de Energía Renovable de Texas (TREIA) define a las energías renovables como: “Cualquier energía que es generada en un corto periodo de tiempo obtenida directamente del Sol (como térmica, fotoquímica o fotoeléctrica), indirectamente del Sol (como la eólica, la energía hidroeléctrica y la energía fotosintética obtenida de la biomasa) o de otros movimiento y mecanismos naturales del entorno (como la geotérmica y mareomotriz). Las energías

renovables no incluyen las derivadas de combustibles fósiles, desechos procedentes de fuentes fósiles o desechos procedentes de fuentes inorgánicas”.

De acuerdo con la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE), del 2008, en su Artículo 3º, Fracción II, las energías renovables son aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, proceso o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica.

Las definiciones anteriormente citadas tienen distintos enfoques, desde considerar que las energías renovables son un recurso que genera la naturaleza por sí solo, hasta mencionar que es una energía limpia, es decir, que es inocua con el ambiente en el que se desarrolla.

Las fuentes renovables permiten la obtención de energía útil para diversas aplicaciones y su aprovechamiento tiene menores impactos ambientales que los de fuentes convencionales, poseen el potencial suficiente para satisfacer todas las necesidades de energía presentes y futuras, su utilización contribuye a conservar los recursos energéticos no renovables, y propicia el desarrollo regional (Mayorga, 2014)

Las nuevas tecnologías que explotan estos recursos pueden generar calor o combustibles, pero todas pueden ser utilizadas para generar electricidad.

Las energías renovables se pueden clasificar por su origen, por su nivel de desarrollo y por la aplicación de la energía que genera, como se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1. Clasificación de las Energías Renovables (Mayorga, 2014).**

FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE	ORIGEN PRIMARIO DE LA ENERGÍA			NIVEL DE DESARROLLO DE LAS TECNOLOGÍAS			APLICACIONES		
	Energía solar	Calor de la corteza terrestre	Movimiento relativo de la luna y el sol	Convencional	Nueva	En desarrollo	Electricidad	Calor	Combustibles líquidos
Eólica	•				•	•	•		
Solar	•				•	•	•	•	
Hidráulica	•			•			•		
Bioenergía	•			•	•	•	•	•	•
Geotérmica	•	•		•		•	•	•	
Olas	•					•	•		
Mareas			•			•	•		
Corrientes oceánicas	•		•			•	•		
Otras energías oceánicas	•					•	•		

## 2.2 Panorama mundial de energías renovables

Las actividades cotidianas en nuestro hogar, así como los procesos industriales y en general el desarrollo económico requieren de energía. Se espera que la demanda de energía mundial crecerá un 37% hasta el 2040 (WE, 2014), esto en parte debido al crecimiento exponencial de la población mundial y el estilo de vida que actualmente se tiene con el desarrollo tecnológico.

Los recursos energéticos se han dividido en tres categorías fósiles, los recursos renovables y nucleares (Mayorga, 2014).

Los combustibles fósiles son el principal recurso de energía en el mundo y son el centro de las demandas mundiales de energía. Sin embargo, las reservas de combustibles fósiles son limitadas y su uso a gran escala está asociado con el deterioro del medio ambiente.

En todo el mundo, el aumento del consumo, la liberalización de los mercados y la necesidad de adoptar medidas para combatir el cambio climático están generando nuevos desafíos para el sector energético (Ruíz, 2010)

No obstante el declive en los precios del petróleo, en 2014 la energía renovable se desarrolló, particularmente en países en desarrollo, de manera análoga al consumo (REN 21, 2015).

En este contexto la sociedad en general está cada vez más consciente de que las energías renovables son críticas para atender los problemas del cambio climático, pues se mejoraría la resistencia de los sistemas de energía existentes y se garantizaría la entrega de servicios energéticos aún en condiciones climáticas inestables.

De manera global, las energías renovables son el tercer mayor contribuyente en producción de electricidad, representaron el 21.6% de la generación de energía en el mundo en 2013, después del carbón (41,2%) y ligeramente por detrás del gas (21.8%), pero por delante de las fuentes nucleares (10.6%) y petróleo (4.4%). Los proyectos hidroeléctricos representan la inmensa mayoría de la electricidad renovable, generando 16.3% de la electricidad mundial, y el 75.1% del total de electricidad renovable. Los biocombustibles y los residuos, incluyendo los biocombustibles sólidos, juegan un papel menor en la generación de electricidad, el suministro de un 1.7% de la electricidad mundial. A pesar de su crecimiento acelerado, la geotérmica, energías solar y eólica representó sólo el 3.7% de la producción mundial de electricidad en 2013 (IEA, 2015).

En todo el mundo desde el año 1990 la generación de electricidad renovable creció en promedio un 3.5% anual, que es ligeramente más rápido que la tasa de generación total de electricidad (3.0%). Así, mientras en que 1990 el 19.5% de la electricidad mundial se producía a partir de fuentes renovables, este porcentaje aumentó ligeramente a 21.6% en 2013.

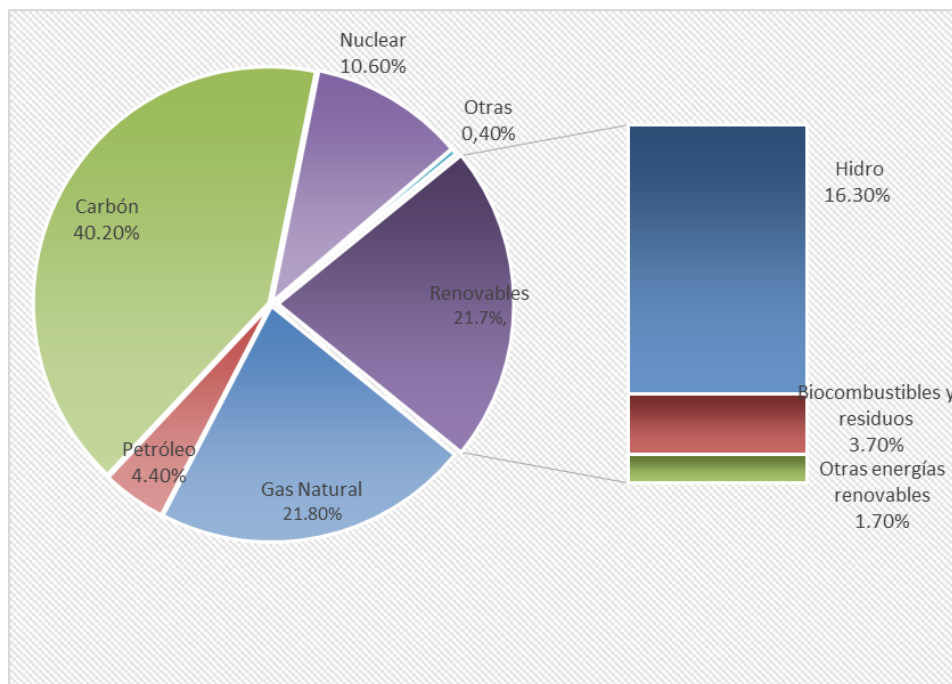


Figura 1. Generación eléctrica mundial (REN 21, 2015)

Este aumento se compensa como el resultado de un crecimiento lento de la principal fuente renovable, la energía hidroeléctrica, con su participación en la producción total de electricidad en el mundo bajo del 18.1% en 1990 a 16.3% en 2013. Sin considerar la energía hidroeléctrica de las energías renovables, la proporción de las restantes fuentes renovables utilizada para producir electricidad crecieron desde el 1.3% en 1990 al 5.4% en 2013.

Desde 1990 la electricidad renovable creció un promedio de tasa media anual del 2.4% en los países de la OCDE, mientras que el aumento en los países fuera de la OCDE fue del 4.6%. Sin embargo, en países fuera de la OCDE, la electricidad renovable creció más lento que el incremento total de la electricidad (4.6% frente 4.9%). En todas las regiones fuera de la OCDE, excluyendo a Europa y Eurasia, el aumento en la generación de la electricidad ha sido más alta que en la OCDE. Estas regiones incluyen economías en desarrollo, como la de Asia y África, donde el crecimiento de la población es mucho mayor (IEA, 2015).

Los legisladores se han concentrado predominantemente en el sector eléctrico, tendencia que ha dibujado el panorama actual. Las políticas de alimentación de energía y de las normas de la cartera de renovables (NCR) siguen siendo los mecanismos de apoyo más utilizados. Las políticas de alimentación se han promulgado en 108 jurisdicciones a nivel nacional, estatal o de provincias. Egipto fue el único país que añadió una nueva FIT (feed-in tariff, tarifa de alimentación); mientras que los responsables de políticas públicas, particularmente en Europa, continúan con la tendencia reciente de enmendar políticas existentes. Las políticas NCR son las más populares a nivel estatal y de provincia, pues éstas ya están en vigor a nivel nacional en al menos 26 países y en 72 estados/provincias. Las políticas de balance neto y facturación neta se encuentran en vigor en 48

países; asimismo, en aproximadamente 126 países está vigente algún tipo de apoyo financiero para energías renovables (ver figura 2.)

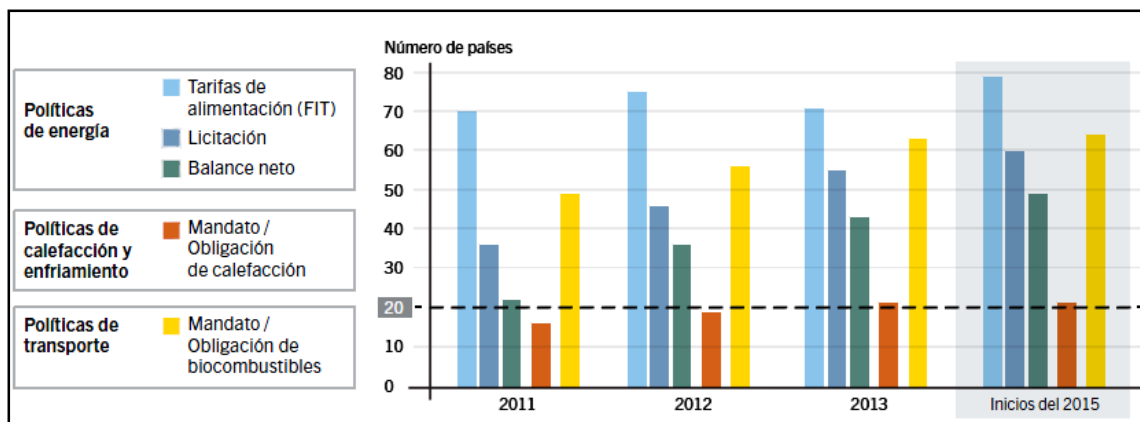


Figura 2. Número de países con políticas de energía renovable, por tipo 2011-2015 (REN12-2015)

Mientras que la amplitud de políticas ha sido articulada integralmente, dentro de los atributos principales de estas políticas se encuentran la previsibilidad, el nivel de campo en juego y la inclusión de los impactos materiales.

Desde el punto de vista de las diversas perspectivas con las que se visualizan las energías renovables se pueden mencionar las siguientes: la primera es el posible hecho de que las energías renovables tomen un curso de crecimiento y desarrollo y con el tiempo desplacen la producción de energía convencional, es decir, proveniente de fuentes fósiles. Otra perspectiva sugiere un avance mucho menos alentador para el mundo de las energías renovables dado sus posibles impactos que pueda generar como el potencial deterioro del suelo en donde se implanten los sistemas de bioenergía o alteración a la flora y fauna de ciertos lugares, lo que hace que las políticas que apoyen este tipo de energías no se desarrollen o en su defecto su implantación sea complicada.

Las energías renovables en cualquier escenario son impulsadas por la demanda del consumidor, lo que implica que cuanto más flexible, eficiente y limpia, será una mejor opción para su uso.

### 2.3 Escenario de las energías renovables en México

Los recursos energéticos renovables con los que nuestro país cuenta son muy abundantes, sin embargo, ello no implica que todas estas fuentes de energía sean técnica, ambiental económicamente viables para su aprovechamiento. Por esta razón es importante conocer cuál es su situación en materia de energía.

- **Sector eléctrico mexicano**

En México, el mercado de la electricidad está dividido en cinco regiones (Ver figura 3). El noroeste comprende los estados de Baja California Norte y Sur, Sonora y Sinaloa, al noreste Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Durango y Tamaulipas. El centro-oeste está formado por los estados de Michoacán, Nayarit, Colima, Querétaro, Jalisco, Zacateas, San Luis Potosí, Aguascalientes y

Guanajuato. Los estados de México, Morelos, Hidalgo, Cd. De México, Puebla y Tlaxcala conforman el centro. En el sur y sureste son Campeche, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Quintana Roo, Veracruz, Yucatán y Tabasco.



Figura 3. División del mercado eléctrico (SENER, 2015).

- **Marco legal de las energías renovables**

En México, todas las leyes y reglamentos que existen tienen su fundamento en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, referente al sector eléctrico se encuentran los Artículos 25, 27 y 28 constitucionales. De manera particular, el marco legal para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables de energía está integrado por la Ley de Transición Energética (LTE), la Ley de la Industria Eléctrica y la Ley de Inversión extranjera.

La Legislación aplicable a la materia de Energías Renovables, es relativamente nueva dentro del Marco Jurídico Nacional, no obstante que existen varios ordenamientos de regulación indirecta (Ver Tabla 2), es decir que el contenido de sus disposiciones involucra aspectos vinculados con las Energías Renovables (Cámara de diputados, 2014).

**Tabla 2. Leyes vinculadas con las energías renovables (SENER, 2015).**

LEY	PUBLICACIÓN DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN
<b>Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.</b>	28 de noviembre de 2008
<b>Ley de Petróleos Mexicanos</b>	28 de noviembre de 2008
<b>Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.</b>	8 de octubre de 2003
<b>Ley de Desarrollo Forestal Sustentable.</b>	25 de febrero de 2003
<b>Ley General de Energía para el campo.</b>	30 de diciembre de 2002
<b>Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo.</b>	29 de noviembre de 1958
<b>Ley de Comisión de Energía.</b>	31 de octubre de 1995
<b>Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica</b>	22 de diciembre de 1975

Por otra parte, existen ordenamientos federales que se podrían considerar como los instrumentos jurídicos más destacables en materia de Energías Renovables, en particular:

**Tabla 3. Instrumentos jurídicos en materia de Energías Renovables (SENER, 2015).**

LEY	PUBLICACIÓN EN EL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN
<b>Ley de Transición Energética</b>	24 de diciembre de 2015
<b>Reglamento de la Ley de Transición Energética</b>	4 de mayo de 2017
<b>Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos.</b>	1° de febrero de 2008

El 11 de agosto de 2014 fueron promulgadas y publicadas por el Ejecutivo Federal las Leyes Secundarias aprobadas por el Congreso de la Unión. Éstas permiten la implementación de la Reforma Constitucional en Materia de Energía publicada en el DOF el 20 de diciembre de 2013.

Por otro lado se cuenta con políticas para la promoción de energías renovables las cuales se enuncian a continuación:

- Estrategia Nacional de Energía 2013-2017 (ENE): propicia la inclusión social a los beneficios del uso de la energía, la sustentabilidad a largo plazo del sector, y la mitigación de los impactos negativos de la producción y los consumos energéticos, incluyendo la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- EL programa sectorial de Energía 2013-2018 (PROSENER): en este programa se establecen los objetivos, estrategias y líneas de acción de las dependencias y organismos del sector para la presente administración y establece de llegar a un 34.6% de capacidad instalada de generación de energía eléctrica a partir de energías renovables y tecnologías limpias en 2018.
- Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables 2014-2018 (PEAER): es el instrumento de planeación rector de la política pública de México en materias de Energías Renovable, entre sus metas están incrementar la participación de capacidad instalada con energías renovables y tecnologías limpias e incrementar el porcentaje de generación con energía renovable.

- Programa Estratégico de Formación de Recursos Humanos en Materia Energética (PEFRHME): tiene como objetivo contribuir a la captación, desarrollo y retención del talento necesario para la construcción de una industria energética nacional atractiva, dinámica y competitiva.
- Comisión Intersecretarial de Bioenergéticos: Integrado por SAGARPA, SENER, SEMARNAT, SE Y SHCP; tiene como objetivo coordinar las políticas de la Administración Pública Federal en Materia de Bioenergéticos, y la elaboración de programas de corto, mediano y largo plazos, relacionados con la producción y comercialización de insumos, la producción, el almacenamiento, el transporte, la distribución, la comercialización y el usos eficiente de Bioenergéticos.
- Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnología y Combustibles más limpios: Este instrumento es una extensión del PRONASE, el cuál integra recomendaciones de política para impulsar la transición energética. Incluye una serie de acciones que el país podrá adoptar a mediano y largo plazo para desarrollar un mercado energético eficiente, una economía de bajo carbono y mejores condiciones de bienestar social, mediante corresponsabilidad de los tres niveles de Gobierno, el sector privado, la academia y la sociedad.
- Estrategia Nacional de Transición Energética y Aprovechamiento Sustentable de la Energía (SENER, 2013): Apoya la conducción de la política energética nacional para garantizar la seguridad energética y el desarrollo económico del país, tomando como punto de partida la sustentabilidad energética y la transición hacia una sustitución de energías fósiles, combustibles más económicos y más limpios.
- Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional, 2015-2029 (PRODESEN): En el PROSEDEN se expresan los elementos y los programas de ampliación y modernización de la red nacional de transmisión y de redes generales de distribución.

De igual forma se cuenta con instrumentos de promoción, investigación desarrollo e innovación para las energías Renovables, los cuales son los Centro Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIEs). La Secretaría de Energía y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a través del Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética, publicaron las convocatorias para la conformación de los Centros Mexicanos de Innovación en Energía Geotérmica, Solar y Eólica. Posteriormente, y como consecuencia de las buenas expectativas que han generado los CEMIEs, el Fondo de Sustentabilidad Energética expandió esta iniciativa lanzando los Centros Mexicanos de Innovación en Bioenergía y en Energía del Océano (CEMIE-BIO y CEMIE-Océano). En la siguiente tabla se puede ver los Centros Mexicanos de Innovación de Energía.



Tabla 4. Centros Mexicanos de Innovación en Energía (SENER, 2015).

CEMIEs	
<b>Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE-Geo)</b>	Este CEMIE está liderado por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).
<b>Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CEMIE-Sol)</b>	El CEMIE-Sol está liderado por el Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM).
<b>Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico)</b>	El CEMIE-Eólico está liderado por el Instituto de Investigaciones Eléctrica (IIE).
<b>Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía (CEMIE-Bio)</b>	El CEMIE-Bio estará liderado el primer año por el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT) y se conforma por 5 clústers de innovación: Bioalcoholes (CINVESTAB-Unidad Guadalajara), Biocombustibles sólidos (IIES-UNAM), Biodiesel (CIATEJ), Biogás (IPICYT) y Bioturbosina (IPICYT).
<b>Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano (CEMIE-Sol)</b>	Este CEMIE es liderado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.
<b>Centro Mexicano de Innovación en Redes Eléctricas Inteligentes (CEMIE-Redes)</b>	El Cemie-Redes es un centro de investigación aplicada que opera transversalmente en áreas prioritarias para Redes Eléctricas Inteligentes, mediante la creación de sinergias en innovación y desarrollo tecnológico

- **Ley General de Cambio Climático (LGCC)**

La LGCC considera que el cambio climático es un problema de seguridad estratégica nacional y mundial, por lo que es urgente incrementar los esfuerzos de mitigación y reducción de emisiones de GEI, así como desarrollar capacidades de adaptación ante los impactos adversos previsible.

La Ley General de Cambio Climático tiene como objetivo fortalecer políticas públicas, estructura administrativa y de participación social, a través de las cuales se reduzca la vulnerabilidad de los sistemas humanos y naturales del país ante el reto que impone el cambio climático; impulsar la transición hacia una economía competitiva de bajas emisiones de carbono y contribuir a cumplir los compromisos adquiridos por el gobierno mexicano ante el régimen internacional.

Los instrumentos de planeación y política citados en la Ley General de Cambio Climático se muestran en la tabla 5, así como el objetivo de cada uno:

**Tabla 5. Instrumentos de planeación y política (Ley General de Cambio Climático; 2015, 02 abril).**

INSTRUMENTO DE PLANEACIÓN	OBJETIVO
Estrategia Nacional	Promoverá la participación y consulta del sector social y privado, con el propósito de que la población exprese sus opiniones para su elaboración, actualización y ejecución. Deberá ser elaborada por SEMARNAT y aprobada por la CICC.
Programa especial del cambio climático	Se establecerán los objetivos, estrategias, acciones y metas para enfrentar el cambio climático mediante la definición de prioridades en materia de adaptación, mitigación, investigación, así como la asignación de responsabilidades, tiempos de ejecución, coordinación de acciones y de resultados y estimación de costos, de acuerdo con el Plan Nacional de Desarrollo y la Estrategia Nacional, será elaborada por SEMARNAT y aprobada por el CCC.
Programas entidades	Establecerán las estrategias, políticas, directrices, objetivos, acciones, metas e indicadores que se implementarán y cumplirán durante el periodo de gobierno correspondiente de conformidad con la Estrategia Nacional, el Programa, las disposiciones de esta Ley y las demás disposiciones que de ella deriven.
Inventario	Elaborará el contenido del inventario bajo los siguientes términos: I. La estimación de las emisiones de la quema de combustibles fósiles se realizará anualmente. II. La estimación de las emisiones, distintas a las de la quema de combustibles fósiles, con excepción de las relativas al cambio de uso de suelo, se realizará cada dos años. III. La estimación del total de las emisiones por las fuentes y las absorciones por los sumideros de todas las categorías incluidas en el Inventario, se realizará cada cuatro años.
Sistema de información sobre el cambio climático	Debe crear un conjunto de indicadores clave que atenderán como mínimo los temas siguientes.
Fondo para el cambio climático	Se crea con el objeto de captar y canalizar recursos financieros públicos, privados, nacionales e internacionales, para apoyar la implementación de acciones para enfrentar el cambio climático. Las acciones relacionadas con la adaptación serán prioritarias en la aplicación de los recursos del fondo.
Registro	Se deberá integrar un registro de las emisiones generadas bajo los siguientes lineamientos integración del Registro: I. Los gases o compuestos de efecto invernadero que deberán reportarse para la integración del Registro; II. Los umbrales a partir de los cuales los establecimientos sujetos a reporte de competencia federal deberán presentar el reporte de sus emisiones directas e indirectas; III. Las metodologías para el cálculo de las emisiones directas e indirectas que deberán ser reportadas; IV. El sistema de monitoreo, reporte y verificación para garantizar la integridad, consistencia, transparencia y precisión de los reportes, y V. La vinculación, en su caso, con otros registros federales o estatales de emisiones.
Instrumentos económicos	Se consideran instrumentos económicos los mecanismos normativos y administrativos de carácter fiscal, financiero o de mercado, mediante los cuales las personas asumen los beneficios y costos relacionados con la mitigación y adaptación del cambio climático, incentivándolas a realizar acciones que favorezcan el cumplimiento de los objetivos de la política nacional en la materia (Art.92).

## 2.4 Tecnologías de generación de energía convencional

La actividad de generación consiste de forma simplificada, en transformar mediante una tecnología concreta una energía primaria (nuclear, térmica, hidráulica, eólica, solar, etc.) en energía eléctrica.

Más del 65% de la energía eléctrica del es generada mediante turbinas de vapor que funcionan mediante la quema de combustibles fósiles como fuente de energía.

Las principales tecnologías de generación de energía en el mundo son las siguientes:

- **Centrales térmicas (termoeléctricas)**

Esta tecnología se basa en el aprovechamiento de la energía térmica (o calorífica) procedente de la combustión de fuentes energéticas como el carbón, el petróleo o el gas, para calentar agua y producir vapor, y con el vapor impulsar las turbinas que generan energía eléctrica.

Este tipo de centrales (especialmente las de carbón y combustóleo) tienen un gran impacto ambiental debido a la emisión de gases contaminantes y partículas a la atmósfera (Sabugal S. & Gómez F., 2006)

Se pueden mencionar dos tipos de centrales térmicas: centrales térmicas convencionales y centrales térmicas de ciclo combinado.

- ✓ **Centrales térmicas convencionales**

El proceso es el siguiente:

- I. En la caldera se realiza la combustión de la fuente energética correspondiente (carbón, petróleo y gas). La energía térmica generada calienta un circuito de agua y la transforma en vapor de agua a alta presión y temperatura.
- II. El vapor se lleva hasta una turbina de vapor, donde la mueve y genera un movimiento rotacional del eje.
- III. El eje, unido al alternador, hace que éste genere energía eléctrica, la cual se transforma y se vierte a la red.
- IV. Una vez que el vapor de agua mueve el conjunto turbina-alternador, se convierte en agua en el condensador y a continuación se enfría en la torre de condensación con el objetivo de reiniciar el ciclo.

- ✓ **Centrales térmicas de ciclo combinado.**

En estas centrales, la energía térmica del gas natural es transformada en electricidad. La energía térmica del combustible se transforma en electricidad mediante dos ciclos: el correspondiente a una turbina de gas y el convencional de agua/turbina de vapor (González, 2012):

- I. En una turbina de gas se produce la combustión de gas. Los gases de combustión que se producen se conducen hasta una turbina de gas donde la energía se transforma en energía mecánica de rotación que se transmite al alternador acoplado, donde se produce la energía eléctrica.
- II. A la salida de la turbina de gas, estos gases de combustión que aún están a una temperatura elevada, se usan para generar vapor de agua, que será llevada a una turbina de vapor que acoplada a otro alternador producirá energía eléctrica.

Conviene señalar que el desarrollo actual de esta tecnología tiende a acoplar las turbinas de gas y de vapor al mismo eje, accionando así conjuntamente el mismo alternado.

- **Centrales nucleares**

Las centrales nucleares son un tipo de central térmica que a diferencia de las anteriormente mencionadas la energía calorífica que mueve la turbina no procede de la combustión del carbón, el gas o el petróleo, esta tecnología se basa en la fisión de átomos radiactivos que se caracterizan por su gran potencia (Sabugal S. and Gómez F., 2006).

Los núcleos de algunos átomos, como el uranio, son inestables. Esto significa que, de forma natural en un período de tiempo más o menos largo, acaban rompiéndose para formar otros átomos diferentes que tienen núcleos más pequeños. Este fenómeno, la rotura del núcleo de los átomos para formar átomos más pequeños, se denomina fisión nuclear. Cuando se produce la fisión de un núcleo atómico se desprende una gran cantidad de energía que antes era utilizada por el núcleo para mantenerse unido (González, 2012).

El sistema más usado para generar energía nuclear utiliza el uranio como combustible. En concreto se usa el isótopo 235 del uranio que es sometido a fisión nuclear en los reactores. En este proceso el núcleo del átomo de uranio (U-235) es bombardeado por neutrones y se rompe originando dos átomos de un tamaño aproximadamente la mitad del uranio y liberándose dos o tres neutrones que inciden sobre átomos de U-235 vecinos, que vuelven a romperse, originándose una reacción en cadena. En esta reacción se libera una cantidad muy grande de energía calorífica que se puede aprovechar para generar electricidad y, si no se controla adecuadamente, da lugar a una explosión (así funcionan las bombas atómicas). El mineral de uranio se encuentra en la naturaleza en cantidades limitadas. Es por tanto un recurso no renovable. Hay depósitos importantes de este material en Norteamérica (27.4% de las reservas mundiales), África (33%) y Australia (22.5%).

El funcionamiento de una central nuclear es similar al de una central térmica, pero en lugar de generarse el calor en una caldera por combustión de carbón, el calor se genera en un reactor nuclear. En el reactor se producen reacciones de fisión (ruptura) de los núcleos atómicos del combustible nuclear (generalmente uranio enriquecido). Estas reacciones liberan una gran cantidad de energía en forma de calor, para calentar el agua y transformarla en el vapor a presión que moverá las turbinas de un generador. Estas centrales son muy eficientes: proporcionan mucha energía con poco combustible. Además, no emiten gases contaminantes a la atmósfera, tan sólo vapor de agua desde la torre de refrigeración (González, 2012).

La generación de energía mediante energía nuclear es una tecnología con buen funcionamiento, aunado a que la emisión de gases contaminantes durante el proceso es nula, esta tecnología es una de las más usadas, si bien el porcentaje es bajo comprado con el de las centrales térmicas, es un porcentaje representativo, sin embargo a pesar de las bondades de esta tecnología, es criticada por representar un alto riesgo por el manejo de material radiactivo, por otro lado si bien no genera gases que contaminan a la atmosfera, si genera residuos radiactivos, que en muchos de los casos el tratamiento que reciben únicamente es confinamiento.

## 2.5 Generación de energía eléctrica por fuentes renovables

La energía renovable o energía verde es la energía que se genera a partir de recursos naturales virtualmente inagotables, y su propio consumo no afecta el medio ambiente como la energía solar, eólica, geotérmica, entre otras (Fernández, 2011). También se puede definir a la renovable como la energía que deriva de procesos naturales que son reemplazados constantemente (González J, R. Celaya and A. Licona, 2014)

La generación de energía eléctrica convencional, basada como ya se mencionó anteriormente en la combustión de combustibles fósiles, es la mayor fuente de la contaminación atmosférica. A medida que se desarrollen más fuentes de energía verde desplazando a la generación convencional con lo cual los impactos ambientales globales asociados a la generación de electricidad se reducirán significativamente.

Entre las fuentes de energía renovable se tienen las siguientes: eólica, hidráulica, oceánica, la biomasa y geotérmica (Ver figura 4)

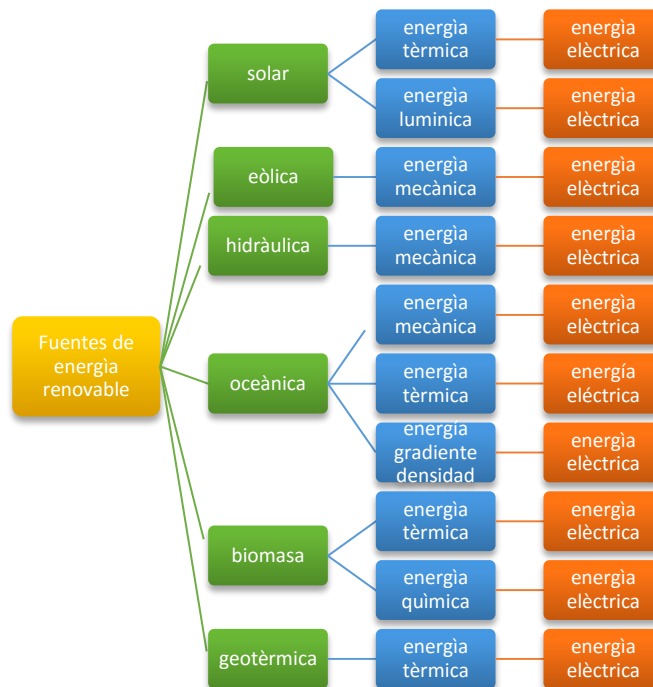


Figura 4. Fuentes de energía y tipo de energía obtenida (Coxtinica, 2015).

## 2.6 Energías del océano

Los océanos de la tierra representan una vasta fuente de energía renovable, ya que es una fuente de energía limpia e inagotable. El sistema de energía del océano cubre todas las formas de recursos renovables oceánicos y se puede dividir en seis tipos de diferente origen y características: oleaje, amplitud de las mareas, corrientes de las mareas, corrientes del océano, la energía térmica del océano y el gradiente de salinidad (Uihlen, 2016; Garzón, 2010).

En la actualidad, todas las tecnologías de energía oceánica, excepto amplitud de las mareas pueden ser consideradas en una etapa temprana del desarrollo del concepto hasta la fase de demostración. El oleaje y la energía de corriente de marea son los dos tipos de energía del océano que están más avanzados y se espera que contribuyan de manera significativa al suministro de energía en el futuro.

Las olas son el símbolo más conocido de la energía del océano. Una de las ventajas más importantes de la energía de las olas en comparación con otras formas de energía derivada de la energía solar es la alta densidad de la energía de las olas. La cantidad de esta energía depende de la longitud de la ola y su altura. Se estima que hay cerca de 106 MW de potencia en olas del mundo que inciden sobre la costa. Si se consideran las olas del mar abierto, esta energía puede aumentar a 107 MW (Bigili, 2015).

La industria de la energía de los océanos ha hecho progresos significativos en los últimos años, pero aún se encuentra en fase muy temprana con algunos prototipos avanzados que se están probando actualmente. Los retos actuales incluyen un mayor desarrollo de la tecnología para demostrar la fiabilidad, robustez y reducir los costos, sino también el despliegue y la reducción del riesgo (Uilen, 2016).

Como se ha mencionado anteriormente en la actualidad, la tecnología con la cual se puede obtener energía eléctrica a partir de los océanos se encuentra en desarrollo, a continuación se enlista la tecnología disponible actualmente:

La energía de las mareas: es la energía potencial asociada con la subida y bajada periódica del nivel del agua (pleamar y bajamar), las mareas son fluctuaciones periódicas del nivel de los océanos, debido a la atracción gravitatoria de la luna y del Sol y a la rotación de la Tierra. Esta energía es aprovechable mediante la construcción de presas en los litorales, las centrales mareomotrices funcionan gracias al flujo ascendente y descendente del agua.

- La energía de biomasa marina: se obtiene a partir de algas de crecimiento rápido, su proceso de producción se realiza mediante fermentación y digestión anaerobia para generar metano y biodiesel a partir del aceite extraído o incluso hidrógeno.
- Energía de las corrientes marinas: Consiste en la obtención de energía cinética generada por el desplazamiento de las masas de agua de los océanos. Estos desplazamientos son generados principalmente por los vientos constantes y las diferencias de densidad en el agua, mientras que la morfología de las costas y el movimiento de rotación terrestre (que actúan de manera distinta en el fondo del océano y en la superficie) influyen en su dirección.

- Energía de gradiente salino: se basa en el fenómeno conocido como ósmosis, que se define como el transporte de agua a través de una membrana semi-permeable, el agua dulce y el agua salada son guiadas a cámaras separadas, divididas por una membrana artificial, las moléculas de sal en el agua de mar desplazan el agua dulce a través de la membrana, lo que aumenta la presión sobre el lado del agua del mar que posteriormente acciona una turbina generadora de energía eléctrica (Hernández, 2013).
- Energía mareomotriz: Es la energía que se produce debido a la variación del nivel del mar influenciada por la atracción del sol y la luna, esta fuerza de atracción es mayor cuando ambos cuerpos se encuentran localizados más cerca de la tierra que cuando están más alejados. La energía mareomotriz se basa en el aprovechamiento de la energía cinética y potencial por el ascenso y descenso del agua de mar, esta energía es aprovechada por turbinas que impulsan un alternador que genera energía eléctrica.
- Energía termo oceánica: Esta energía es la que permite convertir en energía útil el gradiente de temperatura existente entre la superficie y las profundidades del océano en determinadas zonas geográficas.

### ***Energía del oleaje o undimotriz***

Es la energía producida por el movimiento de las olas, el cual se produce por la acción del viento sobre la superficie del mar. Con esta energía se puede aprovechar tanto la energía cinética como la energía potencial y transformálas en energía eléctrica a partir de la energía mecánica que se genera con el movimiento de las olas.

A lo largo de tiempo se ha desarrollado una gran número de dispositivos undimotrices, aunque cabe resaltar que un gran porcentaje de estos dispositivos se encuentran en etapa de prueba y solo muy pocos han logrado alcanzar su etapa comercial. Estos dispositivos se pueden clasificar en función de varios criterios como se muestra en la tabla 6.

**Tabla 6. Clasificación de dispositivos undimotrices (Adaptado de Hernández, 2013).**

<b>CLASIFICACIÓN CON BASE EN SU FUNCIÓN</b>	<b>TIPO DE DISPOSITIVO</b>
<b>De la posición respecto a la costa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En la costa (onshore)</li> <li>• Cerca de la costa (Nearshore) 10-40m</li> <li>• Mar adentro (Offshore)&gt;50m</li> </ul>
<b>Orientación respecto al oleaje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absorbedores puntuales</li> <li>• Atenuadores</li> <li>• Totalizadores o terminadores</li> </ul>
<b>Principio de operación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas pasivo o estático</li> <li>• Sistemas activo u oscilante</li> </ul>

<b>Captación de energía</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Columna de agua oscilante</li> <li>• Arquímedes</li> <li>• Boya con referencia fija</li> <li>• Cuerpo votante con referencia móvil</li> <li>• Depósitos de rebase</li> <li>• Aparatos de impacto pendulares</li> </ul>
<b>Uso de su energía</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electricidad para suministro a red</li> <li>• Desalación de agua de mar</li> <li>• Bombeo y calentamiento de agua</li> </ul>
<b>Sitio de instalación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fijos, en las costas</li> <li>• Flotantes, mar adentro.</li> </ul>

## 2.7 Energía a partir de biomasa

La biomasa o masa biológica es la cantidad de materia viva producida en un área determinada de la superficie terrestre, o por organismos de un tipo específico, que puede ser utilizada como combustible energético y se obtiene directa o indirectamente de recursos biológico. Las fuentes de aprovechamiento de la biomasa para la generación de energía provienen principalmente de tres sitios: desechos industriales y municipales; residuos de cultivos agropecuarios; y cultivos o plantaciones con propósitos energéticos (Garzón, 2010).

La energía a través de la biomasa es considerada como una energía renovable y limpia, siempre y cuando su uso sea moderado: esto quiere decir que su utilización no sobrepase la creación de la misma. El poder calorífico de la biomasa depende mucho del tipo de biomasa considerada y de su humedad. Así normalmente estos valores de poder calorífico de la biomasa se pueden dar en base seca o en base húmeda.

- ***Clasificación de la biomasa***

Existen diferentes tipos o fuentes de biomasa que pueden ser utilizados para suministrar la demanda de energía de una instalación, una de las clasificaciones más generales se muestra en la figura 5.



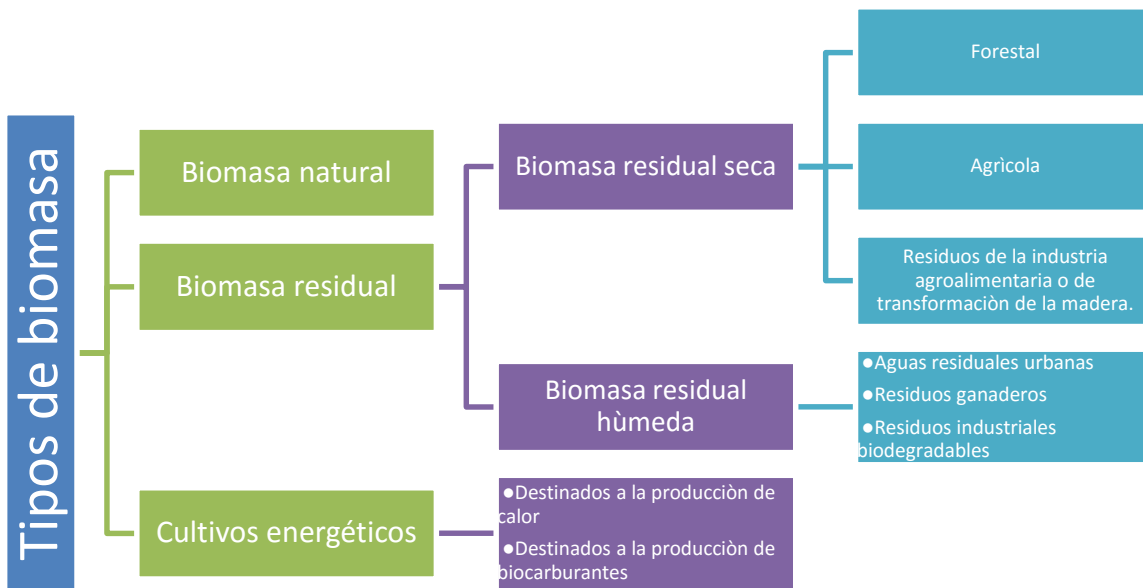


Figura 5. Tipos de biomasa (Adaptado de: Nogués & Royo, 2002)

- **Características de la biomasa para su aprovechamiento energético**

Uno de los aspectos fundamentales a considerar de la biomasa es su poder calorífico, que es el que nos indica la cantidad de energía susceptible para su aprovechamiento. El poder calorífico de la biomasa puede oscilar entre los 3000 – 3500 kcal/kg para los residuos ligno celulósicos, los 2000-2500 kcal/kg para los residuos urbanos y finalmente los 10000 kcal/kg para los combustibles líquidos provenientes de cultivos energéticos (Secretaría de Energía, 2008).

Estas características, juntamente con el bajo contenido de azufre de la biomasa, la convierten en un producto especialmente atractivo para ser aprovechado energéticamente.

Otra característica importante de la biomasa es que toda materia orgánica puede ser aprovechada para la producción de energía, dependiendo de la aplicación a la que estén destinados.

Una de las características más importantes del uso de biomasa como combustible es que presenta beneficios significativos; desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento energético de la biomasa no contribuye al aumento de los gases de efecto invernadero, es decir, contribuye a la mitigación del efecto del cambio climático, a reducir la lluvia ácida y la contaminación del agua, así como a la reducción de las cantidades de desechos en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto, y de manera general a mejorar el ambiente y el hábitat natural.

Cabe destacar que, desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento energético de la biomasa no contribuye al aumento de los gases de efecto invernadero, dado que el balance de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera es neutro.

- **Aplicaciones energéticas de la biomasa**

Existen diferentes tecnologías para la transformación de la biomasa en energía. Principalmente se puede generar energía térmica y energía eléctrica.

- I. Producción de energía térmica

El sistema más extendido para este tipo de aprovechamiento consiste en combustión directa de biomasa sólida, aunque también es posible quemar el biogás procedente de la digestión anaerobia de un residuo líquido o el gas de síntesis generado en la gasificación de uno sólido. También se pueden aprovechar para hacer vapor para la industria o para generar electricidad.

- II. Producción de energía eléctrica:

La obtención de energía eléctrica a través de la quema de biomasa sólida se realiza generalmente a gran escala (plantas mayores de 2MW). Esto es debido principalmente a que las instalaciones necesarias requieren una gran inversión económica

- **Funcionamiento de una central de biomasa de generación eléctrica**

En las plantas de energía basadas en la biomasa, el calor producido por la combustión directa de biomasa en una caldera puede utilizarse para generar electricidad a través de una turbina de vapor (Bigili, 2016).

El funcionamiento de una planta de biomasa para la generación de energía eléctrica consiste en la recepción de la biomasa, generalmente en forma de alpacas (paja ó astillas), posteriormente se colocan automáticamente en una cinta transportadora, que las conduce hasta la caldera. Allí, previamente desmenuzadas, caen a una parrilla vibratoria que favorece la combustión y la evacuación de residuos que no lograron su combustión. Dicha combustión calienta el agua que circula por las tuberías de las paredes de la caldera y por haces de tubos en el interior de la misma convirtiéndola en vapor sobrecalentado (Nogués & Royo, 2002).

El vapor sobrecalentado mueve una turbina conectada a un generador que produce electricidad a una tensión determinada, transformándola posteriormente a otra tensión mayor para su incorporación a la red general.

Los residuos que no lograron su completa combustión depositados en el fondo de la caldera, se trasladan a un vertedero autorizado, y las cenizas volantes, retenidas por un filtro, se aprovechan para fertilizantes agrícolas.

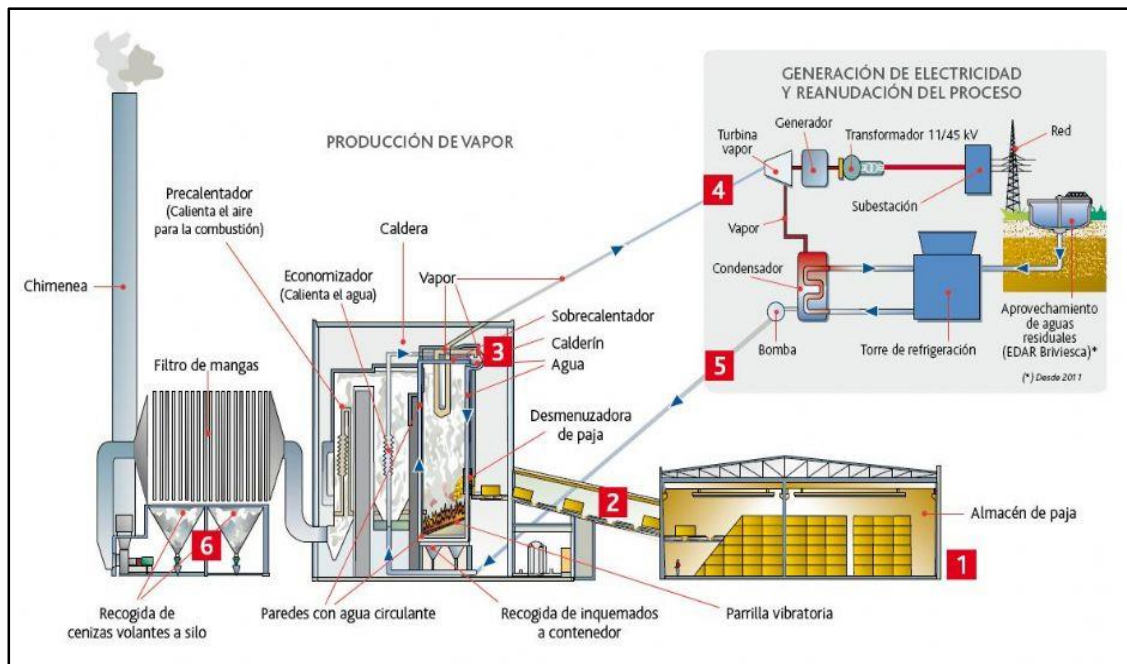


Figura 6. Esquema de una planta de generación de energía mediante el uso de biomasa.

En una escala compatible con la disponibilidad de materias primas de biomasa locales (10 a 50 MW), la eficiencia de generación de energía que utilizan turbinas de vapor tienden a estar en el intervalo de 18 a 33%, algo más baja que las de las plantas de combustibles fósiles convencionales de escala similar.

- ***Ventajas y desventajas del uso de biomasa como fuente de energía.***

El uso de biomasa para la generación de energía eléctrica tiene ventajas y desventajas, las cuales se pueden observar en la tabla 7.

Tabla 7. Ventas y desventajas del uso de biomasa como fuente de generación de energía.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La biomasa es una fuente renovable de energía y su uso no contribuye al calentamiento global.</li> <li>• La combustión de biomasa produce menor cantidad de ceniza que la de carbón mineral y puede usarse como insumo orgánico en los suelos.</li> <li>• La contaminación es menor que otras fuentes de energía.</li> <li>• Los residuos municipales pueden ser transformados en combustible, evitando la contaminación ambiental y aprovechando su contenido energético.</li> <li>• Toda materia orgánica puede ser aprovechada para la producción de energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su principal desventaja es su baja densidad energética, es decir, se requieren grandes volúmenes para producir energía en comparación con los combustibles fósiles.</li> <li>• Su combustión incompleta produce materia orgánica, monóxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros gases.</li> <li>• Los precios de la generación de energía no compensan los beneficios ambientales.</li> </ul>

## 2.8 Análisis de Ciclo de Vida

Hoy en día se desarrollan métodos para entender e identificar los impactos generados en la producción y el consumo de bienes y servicios, que involucran de manera directa o indirecta el consumo tanto de energía como de materias primas.

Se puede definir como la principal característica del ACV es el enfoque holístico ya que pretende la integración de todas las etapas de la fase de producción y analizarla como un solo sistema, mas no de forma independiente (Ortiz, 2015). De este modo el ACV permite comparar dos o más productos o servicios diferentes, siempre y cuando tenga la misma función (Luján, 2015).

Los sectores empresariales e industriales reconocen ya la utilidad práctica del ACV como parte de los instrumentos de gestión para reducir el uso de las materias primas, ahorrar energía, minimizar la contaminación y los residuos (disminuyendo costos), disminuir problemas, conflictos y riesgos y mejorar.

### 2.8.1 Etapas de ACV

El ACV es un proceso en que se reconocen las siguientes etapas, todas ellas interrelacionadas:

- Definición de objetivo y alcance
- Análisis del inventario del ciclo de vida
- Evaluación del impacto del ciclo de vida
- Interpretación del ciclo de vida

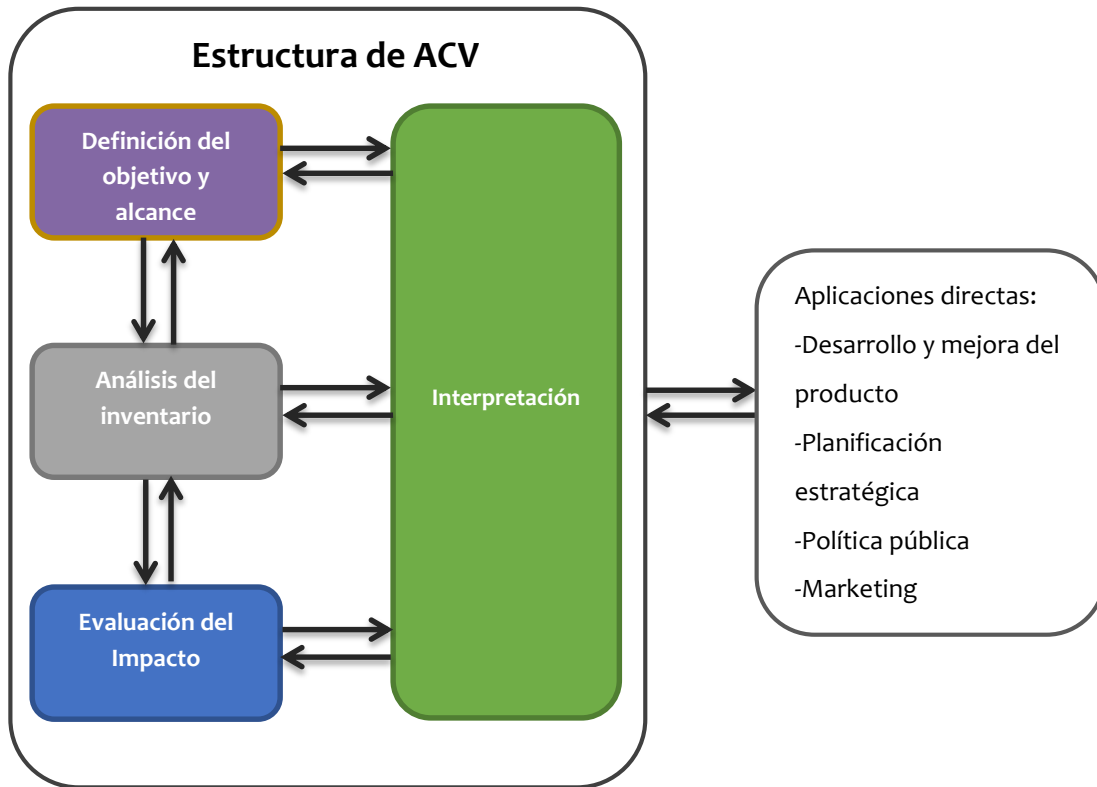


Figura 7. Fases de un Análisis de Ciclo de Vida. Fuente: ISO 14040 (ISO, 2006)

En la figura 7 se ilustran las conexiones entre cada una de las etapas que integran el ACV, mostrando que se trata de un proceso iterativo, el cual permite incrementar el nivel de detalle en sucesivas iteraciones. En virtud de lo anterior un ACV puede ser adaptado a la disponibilidad de información para el desarrollo del mismo.

**DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE:** En esta primera fase de un ACV se debe establecer de forma clara y consistente el propósito del estudio, el rumbo y la extensión del mismo, así como:

- **Sistemas estudiados.** Productos o servicios los cuales se analizarán y compararán (Luján, 2015).
- **Unidad funcional.** Es el elemento clave del estudio, proporciona una base de cálculo a partir de datos matemáticamente normalizados de entradas y salidas funcionales del sistema para asegurar la compatibilidad de los resultados del ACV (Institute for Environment and Sustainability, 2010).
- **Límites del sistema.** Se debe determinar claramente qué unidades de procesos se incluirán en el estudio, con base en el objetivo establecido. En virtud de que el ACV es un estudio holístico, puede resultar muy extenso y complicado llevarlo a cabo, es por esto que los límites del sistema deben ser claro y precisos, identificando qué procesos unitarios deberán incluirse en el ACV, respecto a la aplicación prevista del estudio (Güereca, 2010; Luján, 2015).

**INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (ICV):** Consiste en la recopilación de datos y procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas de los flujos de masa y energía relevantes del sistema, tomando como referencia la unidad funcional. Las entradas incluyen el uso de recursos (materias primas, agua, combustibles, y electricidad) y las salidas incluyen las emisiones al aire, agua y suelo asociadas con el sistema a lo largo del ciclo de vida del producto, en todas sus etapas.

Las interpretaciones pueden sacarse de esos datos, dependiendo de los objetivos y alcance del ACV. Esos datos también constituyen las entradas para la evaluación de impacto de ciclo de vida (ISO, 2006). Los resultados dependen en gran parte de la calidad y veracidad de los datos utilizados para desarrollar el inventario.

En general y de acuerdo a la norma ISO 14041, el análisis del inventario es una lista de todos los flujos entrantes y salientes del sistema durante su vida útil, los cuales son extraídos del ambiente natural o bien emitidos a él, calculando los requerimientos y eficiencia energética, materiales del sistema y emisiones producidas en cada uno de los procesos unitarios (ISO, 2006).

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA (EICV):** Este punto consiste en la evaluación de los impactos ambientales utilizando el análisis de inventario, la EICV valora los efectos ambientales generados por cada proceso unitario considerado en el sistema, estableciendo categorías de impacto en función del objetivo y alcance del caso de estudio.

De acuerdo a la norma ISO 14040, la EICV es la fase en la cual el grupo de datos resultado del análisis de inventario es matemáticamente procesado en términos ambientales. Básicamente en el EICV se traducen los datos de ICV a indicadores de categorías de impacto para reflejar los impactos ambientales relacionados con el producto bajo estudio; los modelos de caracterización de las metodologías respaldan los resultados utilizando los factores de caracterización.

**INTERPRETACIÓN DEL CICLO DE VIDA:** La última etapa del ACV consiste en evaluar los resultados y se plantean conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones, de forma consistente con el objetivo y alcance del estudio (ISO, 2006).

## 2.8.2 Antecedentes del ACV

En la siguiente tabla se muestra la evolución del Análisis del Ciclo de Vida a través del tiempo.

Tabla 8. Cronología del desarrollo del Análisis del Ciclo de Vida (Güereca, 2006).

AÑO	ACONTECIMIENTO
1969	Harry E. Teasley, de Coca Cola, visualizó un estudio que pudiera cuantificar la energía, materiales y consecuencias ambientales a lo largo del ciclo de vida completo del empaque, desde la extracción de la materia prima hasta su disposición final.
1970	El Midwest Research Institute (MRI) desarrollo un estudio-ancestro de los Análisis del Ciclo de Vida, al que se llamó “Resources and Environmental Profile Análisis (REPA)”, donde se analizaron diferentes envases para Coca Cola Company.
1971	El segundo REPA realizado por MRI fue para Nobil Chemical Company, se analizaron las charolas de espuma de poliestireno y las charolas de pulpa de papel.
1972-1976	Se publican largas porciones de las bases de datos y se describe la metodología de los REPA.
1972	En el Reino Unido, Ian Boustead calcula la energía total utilizada en la producción de contenedores de botellas de leche.
1974	La Agencia de Protección ambiental de los Estados Unidos publica el reporte “Resouce and Environmental Profile Análisis of Nine Beverage Container Alternatives”, que marca la entrada de los REPA dentro del dominio público.
1975	El sector público pierde interés en los REPA pero se realizan muchos estudios confidenciales para compañías particulares.
1979	En Reino Unido, Ian Boustead publica el “Handbook of Industrial Energy Análisis”
1980	Se publica un reporte por el Solar Energy Research Institute en los Estados Unidos.
1984	El Laboratorio Federal Suizo para el Ensayo y la Investigación de Materiales (EMPA), publicó un estudio de materiales de envase y embalaje que introducía un método para agregar los distintos impactos ambientales en un solo índice, el llamado “método de los volúmos críticos”
1988	En 1988 la crisis de los residuos sólidos en Estados Unidos y la actividad ambiental en Europa, desencadenaron una explosión de actividad en REPA. Al principio, los residuos sólidos eran la clave, especialmente el cómo reciclar, la sustitución de materiales y el residuo de productos para reducir la dependencia de los vertederos.
1990	Primer taller de la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química (SETAC), para abrir el debate sobre REPA, uno de los resultados fue la adopción del término “Life Cycle Assessment” (LCA), en español Análisis de Ciclo de Vida (ACV).
1991	EPA inicia actividades en ACV con el interés primario de asistir en el desarrollo de guías y bases de datos para el uso del sector público y privado.
1992	En 1992 Franklin Associates publicó un artículo donde se presentaba completa por primera vez a la metodología de ACV. Se crea SPROD (de Society for the Promotion of LCA Development), una asociación de 20 grandes compañías en Europa, con el objetivo de promover el desarrollo y aplicación del ACV.
1993	La EPA publica un documento guía para el inventario. SETAC publica el “Code of Practice” y “LCA Sourcebook” y fomenta numerosos talleres y reuniones que tienen como objetivo alcanzar el consenso en los metodológicos del Análisis del ciclo de Vida.

<b>1997</b>	Se publica la serie de normas ISO 14040 referente a ACV.
<b>2000</b>	Se conducen estudios de ACV en todo el mundo, muchos de estos trabajos son a gran escala y se enfocan en los combustibles fósiles, la energía nuclear y las energías renovables para producir electricidad.
<b>2002</b>	Se lleva a cabo la Reunión Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo en Johannesburgo y se reconoce al ACV como una herramienta de apoyo para fomentar el cambio en los patrones de consumo y producción.
<b>2002-2006</b>	Se realizan ACV en todo el mundo. Se forman asociaciones de ACV por regiones y desarrollan investigación, aplicación, consultorías y reuniones. Se desarrollan modelos computacionales especializados y genéricos. Se forman grupos de trabajo por áreas que buscan en el desarrollo metodológico.
<b>2011</b>	Se desarrolla una serie de directrices y estándares basados en ACV, incluyendo el Instituto Mundial de Recursos y el Consejo de Negocios Mundiales para el Desarrollo Sostenible PAS 2050: 2011, en el que se incluye la especificación para la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero de bienes y servicios.
<b>2012</b>	El Instituto para el Medio Ambiente y la Sostenibilidad del Centro Común de Investigación de la Comisión Europea publicaron el Manual del Sistema Internacional de Datos de Ciclo de Vida de Referencia como parte del impulso del ciclo de vida europeo y especifica las disposiciones más amplias de las normas ISO 14040 y 14044.
<b>2014</b>	Al igual que la etiqueta de contenido nutricional de los productos alimenticios, cientos de empresas están utilizando ACV para justificar la declaración de producto medioambiental de su producto en una certificada y verificable por terceros. ACV recibió una amplia cobertura en la revista Science, donde publicó su edición de junio de 2014 sobre la sostenibilidad de las cadenas de suministro mundiales.

## 2.9 ACV-Energías de Océano

A nivel mundial existen estudios de ACV para diversas energías renovables. Por ejemplo, en Douglas (2007) se presenta el ACV y la estimación de emisiones de CO<sub>2</sub> de las turbinas de corriente marina SEAGEN, considerando la fabricación, instalación, funcionamiento y desmantelamiento de las turbinas. En Kelly (2012) se presenta la evaluación de un modelo de barreras de mareas, el cual muestra que barrera del Severn puede cumplir con el objetivo de reducir las emisiones de carbono en Reino Unido. En el cual se identificó como un paso importante la etapa operación por la gran cantidad de energía empleada. Esto fue un hallazgo notable ya que en estudios anteriores habían tendido a desestimar las consecuencias de la operación como mínimo o nulo. Las consecuencias son similares a las presas de las mareas tanto en el Reino Unido como en el mundo. Otro estudio importante es el realizado por Uihlein (2016), en el cual se describe una guía para la elaboración de un ACV referente a dispositivos de energías del océano, dicho estudio menciona que los impactos ambientales causados por los dispositivos se encuentran estrechamente relacionados a los insumos materiales.

## 2.10 ACV-Energías a partir de Biomasa

Se han realizado estudios de ACV para la generación de energía eléctrica a partir de biomasa. Por ejemplo, en Paccetti (2015) la evaluación de ciclo de vida muestra que la producción de biogás a partir de cultivos energéticos, en general, tiene un impacto negativo, debido a los ahorros asociados con la prevención de la producción de energía convencional, para todos los indicadores



considerados, excepto el agotamiento del agua, la ecotoxicidad del agua dulce y la ecotoxicidad marina. Los resultados ponen de manifiesto a los cultivos como la principal fuente de impactos, debido principalmente a los procesos de fertilización, arado y riego.

En Toniti (2012) se realizó un estudio de los impactos ambientales futuros relacionados con los sistemas de energía de biogás en Dinamarca usando un Análisis de Ciclo de Vida, se evaluaron escenarios energéticos para 2030 y 2050. En general, los resultados mostraron que las emisiones de gases de efecto invernadero por la energía suministrada podrían ser significativamente reducidas gracias al aumento del uso de los recursos de biomasa residual, así como por la electrificación del sector transporte. Los cultivos energéticos para la producción de biocombustibles fueron responsables de la mayoría de los impactos ambientales en el escenario para 2050, en especial los efectos aguas arriba provocados por el cambio de uso del suelo, el uso de fertilizantes y las emisiones de NOx procedentes del sector transporte. La ocupación del suelo causada por la producción de cultivos energéticos aumentó a un rango de 600m<sup>2</sup> a 2100m<sup>2</sup> en función de las cantidades y tipos de cultivos energéticos introducidos. El uso de diésel fósil en el sector del transporte parecía ser ambientalmente preferible sobre biodiésel debido a la acidificación, la eutrofización acuática y la ocupación del suelo.

El estudio realizado por Varun, et al. (2009) compara los efectos ambientales en la producción de electricidad a partir de diferentes biocombustibles por medio de co-combustión con carbón en centrales eléctricas de carbón ya existentes, respecto a la producción de electricidad a partir de carbón. El estudio señala que las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente para el suministro de electricidad a partir de biomasa son mucho más bajas en comparación con las generadas por el uso de carbón.

### 3 METODOLOGÍA

El presente capítulo está dedicado a la descripción de las características metodológicas del ACV realizadas en este estudio, así como las consideraciones tomadas.

En la figura 8 se muestran las etapas metodológicas del presente trabajo.

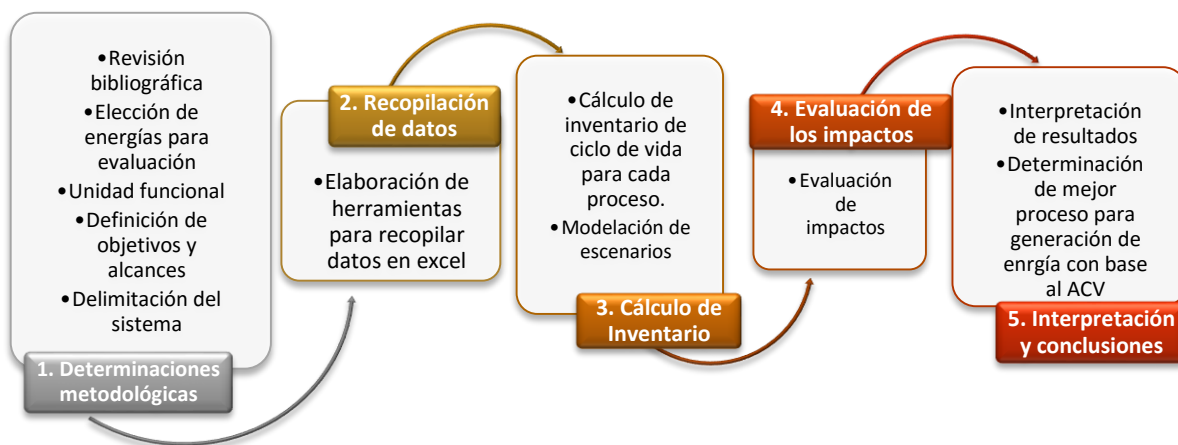


Figura 8. Metodología del ACV

#### 3.1 Definición de objetivos y alcance

##### 3.1.1 Objetivo del ACV comparativo en la generación de energía

Para dar cumplimiento a la norma ISO 14044 el objetivo del presente Análisis de Ciclo de Vida será el mismo objetivo general de este trabajo de tesis: “Desarrollar un Análisis de Ciclo de Vida comparativo de la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovable y convencional en México, para identificar las etapas con mayores contribuciones ambientales y proponer mejoras ambientales”

##### 3.1.2 Alcances

- Comparar los impactos ambientales de la generación de energía eléctrica a partir de dos fuentes de energías renovables (undimotriz y biomasa) y de manera convencional a nivel nacional.
- Conocer los impactos ambientales generados por tres diferentes formas de generación de energía.

- Generar datos de inventario de Análisis de Ciclo de Vida de 8 sistemas de generación de energía para México.
- Evaluar impactos

### 3.2 Límites del sistema

Para los tres tipos de sistema de generación de energía eléctrica se considera todo su ciclo de vida, desde la construcción de la planta, el proceso de extracción de materias primas, la generación de energía mediante la tecnología respectiva de cada una, su distribución y el desmantelamiento de la planta, sin embargo, cabe mencionar que para este análisis no fue considerada la distribución a la red eléctrica de la energía generada por los sistemas.

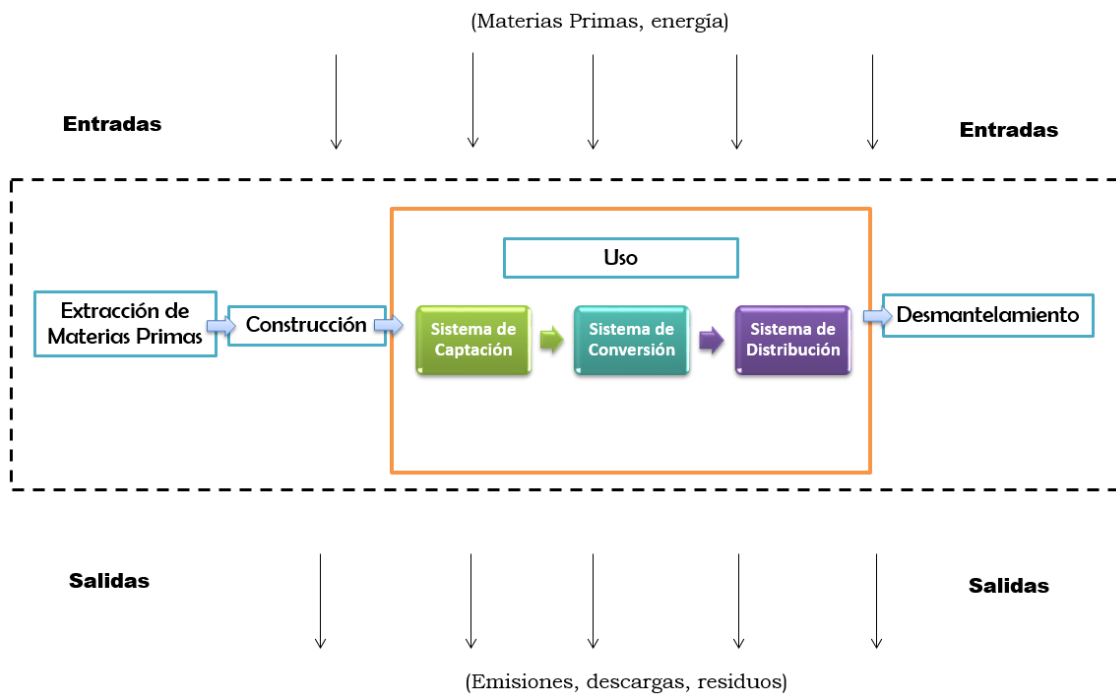


Figura 9. Límites del sistema de la producción de energía eléctrica en una central undimotriz.

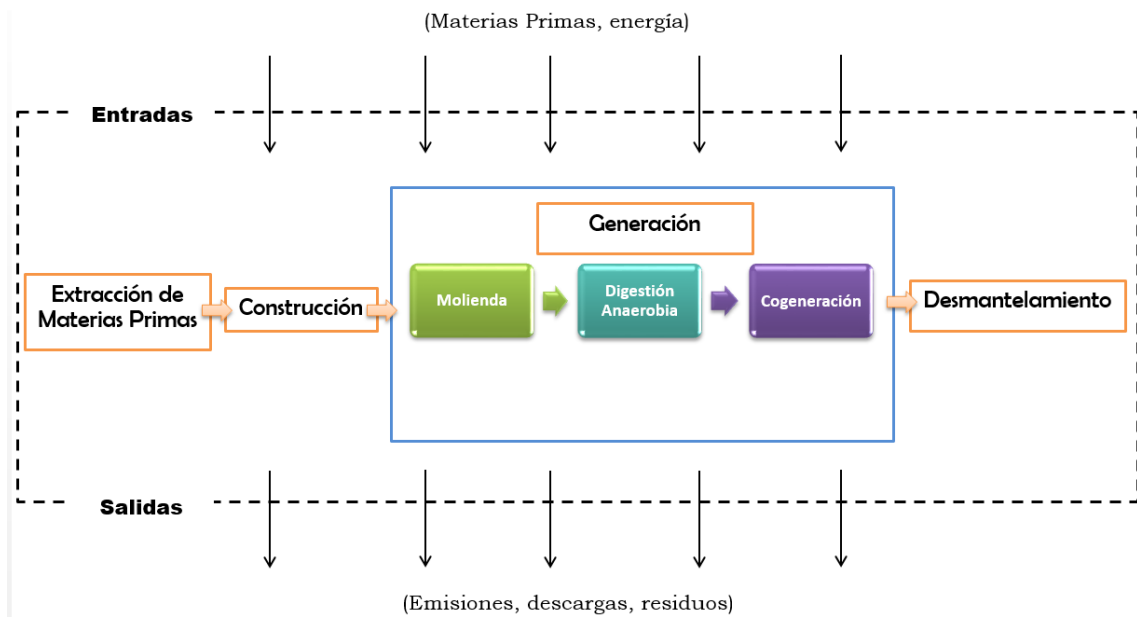


Figura 10. Límites del sistema de la producción de energía eléctrica a partir de biomasa.

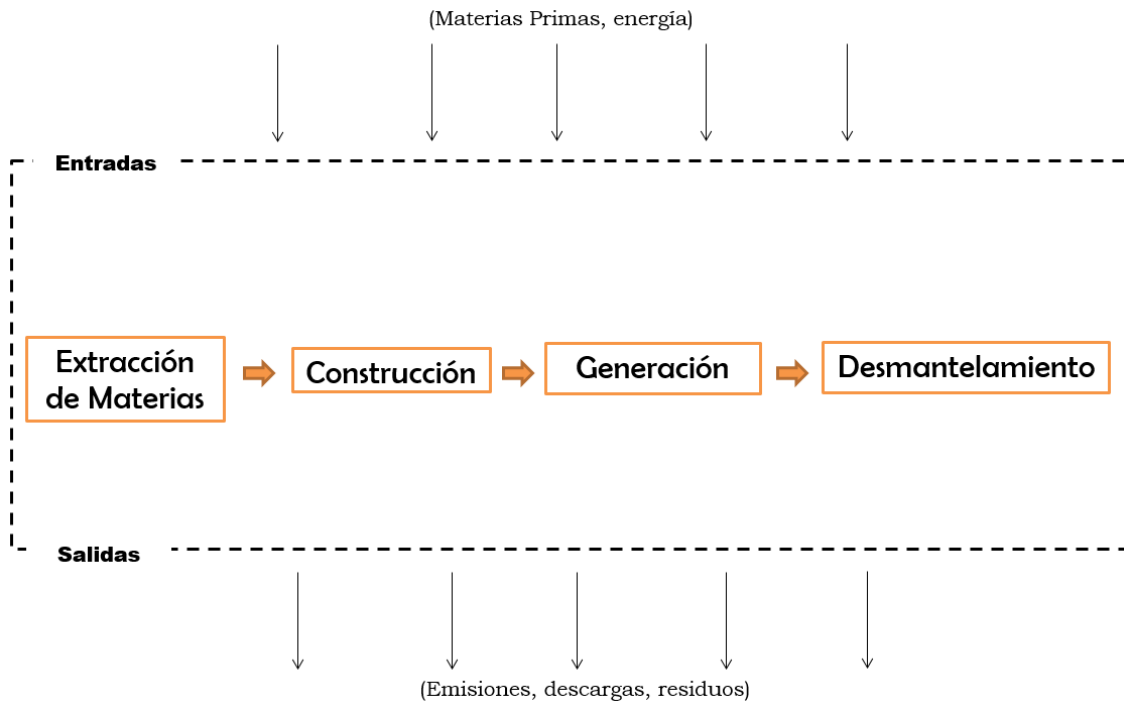


Figura 11. Límites del sistema de la producción de energía eléctrica en una central termoeléctrica convencional

### ***Límites temporales y geográficos***

Se considerará un límite temporal de 10 años de producción de energía eléctrica, delimitando las tres tecnologías en estudio a México.

### ***Límites tecnológicos***

La tecnología que se utilizará será:

- Generación de energía de manera convencional: Central termoeléctrica de ciclo combinado
- Generación de energía mediante energía del océano: Central undimotriz
- Generación de energía eléctrica mediante energía de biomasa: Central de generación de biogás

### **3.3 Unidad funcional**

En diferentes trabajos de ACV para la generación de energía eléctrica se ha considerado la unidad funcional como 1kWh (Ramírez, 2014), Santoyo-Castelazo et al. (2011) se basan en la energía eléctrica generada durante un año, sin embargo también se realizó el estudio para 1kWh esto con la finalidad de poder comparar este análisis con otros realizados a nivel mundial. En este análisis se presentan escenarios diferentes, es decir, generar energía eléctrica empleando diferentes tecnologías (Undimotriz, biomasa y convencional) y se consideró un periodo de 10 años de operación de las plantas, tomando en cuenta que es el periodo de vida estimado para la planta undimotriz en estudio, dicho tiempo limita a las otras tecnologías estudiadas con el fin de una comparación visible. Con lo anterior se tiene que la unidad funcional para este caso de estudio se define de la siguiente manera:

1kWh de energía eléctrica generada considerando un período de tiempo de 10 años, tomando en cuenta las entradas y salidas de materia y energía necesarios durante este periodo.

### **3.4 Descripción del sistema**

Para alcanzar el objetivo del presente ACV comparativo, se estudió la generación de energía eléctrica en México bajo tres diferentes tecnologías.

Los escenarios se construyeron de acuerdo a las alternativas de estudio de las tecnologías disponibles en el momento por parte de los proyectos CEMIE-BIO y CEMIE-OCÉANO. Para el caso de la energía undimotriz, se realizó el análisis de 6 escenarios, esto debido a dos características del proceso, la primera es el tipo de dispositivo empleado para la captación de la energía cinética y potencial; y la segunda característica es la forma de almacenamiento de la energía eléctrica generada durante el proceso, las cuales son el almacenamiento en una batería de iones de litio, en un mini-almacén y/o que la energía eléctrica generada se conecte directamente a la red eléctrica (Ver figura 12).

Esto permite tener un panorama más amplio en cuanto a mejorar el sistema de generación de energía eléctrica a partir de energía undimotriz, para en posteriores investigaciones poder tomarlos en cuenta. Mientras que para la energía a partir de biogás, se analizó un escenario en cual se genera biogás mediante digestión anaerobia de residuos de la industria tequilera.

En la siguiente tabla se presentan los escenarios analizados, así como la abreviación empleada para identificarlos.

**Tabla 9. Escenarios estudiados.**

FUENTE DE ENERGÍA	ESCENARIO
Undimotriz	1) BB-MA: Boya en brazo con mini almacén
	2) BP-MA: Boya en plataforma con mini almacén
	3) BB-B: Boya en brazo con batería
	4) BP-B: Boya en plataforma con batería
	5) BB-Red: Boya en brazo con conexión a red eléctrica a
	6) BP-Red: Boya en plataforma con conexión a red eléctrica a
Bio	7) Biogás: Generación de biogás a partir de bagazo y hojas de agave generado en la producción de tequila
Convencional	8) Convencional: Central de ciclo combinado (gas natural)

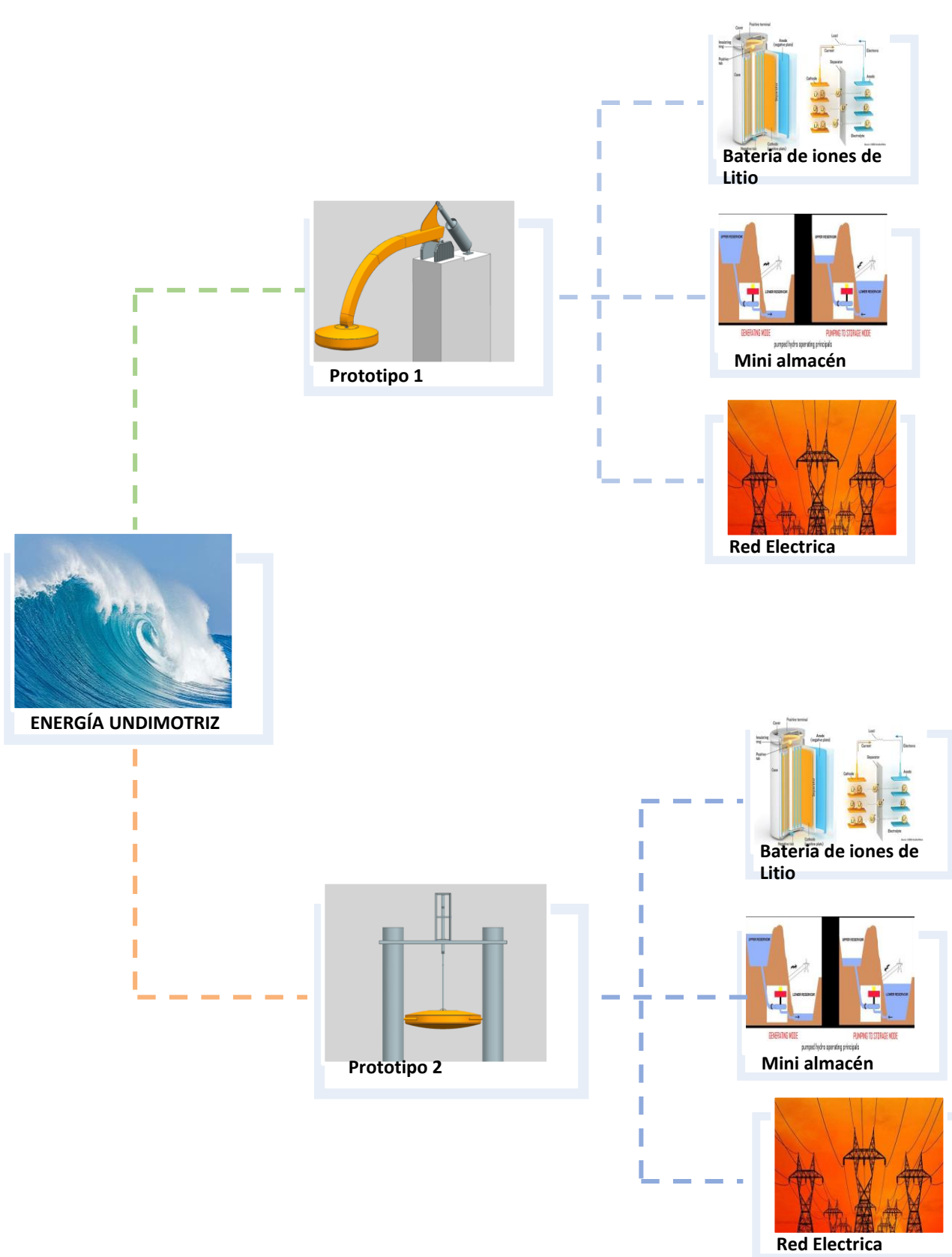


Figura 12. Escenarios de energía undimotriz bajo estudio

### 3.5 Metodología para la Evaluación del Impacto

En la evolución del Análisis de Ciclo de Vida de generación de energías se utilizó el método ReCiPe v1.08, el cual permite la cuantificación de impactos mediante el empleo de indicadores.

- ✓ Método ReCiPe v1.08

El objetivo principal del método ReCiPe v1.08 es transformar la larga lista de resultados de inventario del ciclo de vida, en un número limitado de indicadores. Estos indicadores expresan la gravedad relativa de una categoría de impacto ambiental. En ReCiPe se pueden determinar indicadores a dos niveles:

- a. Dieciocho indicadores del punto medio
- b. Tres indicadores de punto final

ReCiPe emplea un mecanismo ambiental como base para el modelado. Un mecanismo ambiental puede ser visto como una serie de efectos que en conjunto pueden crear un cierto nivel de daño, como a la salud humana o los ecosistemas. Por ejemplo, para el cambio climático se sabe que una serie de sustancias, aumenta la fuerza radiativa, esto significa que se evita que el calor se irradie desde la Tierra hacia el espacio. Como resultado, más energía está atrapada en la tierra y la temperatura aumenta. Así, se puede esperar cambios en los hábitats de los organismos vivos y como consecuencia puede extinguirse la especie (ReCiPe, 2017).

Para realizar la cuantificación de impactos ReCiPe considera indicadores de categoría, lo cuales son lugares medibles en una vía de impacto (Luján, 2015).

La metodología ReCiPe se basa en la metodología CML 2000 (Guinee et al., 2002) y EcoIndicator 99 (Goedkoop y Spriensma, 2000). La diferencia entre estas dos metodologías es que el CML 2000 se centra en indicadores de punto medio, mientras que el EcoIndicator 99 se centra en los indicadores de punto final. Por lo tanto, el ReCiPe se creó con la idea de unir estos dos enfoques.

El cálculo de las magnitudes de estos indicadores de categorías, requieren factores de caracterización (Goedkoop, et al. 2013). Los factores de caracterización consisten en un número adimensional que expresa el potencial daño causado en cada una de las categorías (Luján, 2013).

ReCiPe agrupa diferentes incertidumbres y diferentes escenarios o perspectivas de acuerdo a "Teoría cultural":

- ✓ Individualista (I): Se basa en el interés a corto plazo (20 años)
- ✓ Jerárquica (H): Se basa en los principios más comunes con respecto a marcos de tiempo y otras cuestiones (100 años)
- ✓ Igualitaria (E): Se basa en el interés a largo plazo (500 años)

#### 3.5.1 Elección de categorías de impacto e indicadores

Las categorías de impacto manifiestan preocupaciones ambientales de gran importancia. Se deben seleccionar categorías de impacto de acuerdo a problemáticas de interés internacional y local.



Se eligieron las categorías de impacto de acuerdo a la literatura referente a ACV para generación de energía eléctrica (Santoyo-Castelazo et al., 2011; Paccetti, 2015; Uihlein, 2016), así como a los objetivos del proyecto, considerando la ubicación de cada proceso de generación de energía, en otros estudios realizados de ACV para generación de energía eléctrica. Para la evaluación del impacto de ACV se eligió un modelo de caracterización de punto medio (Midpoint [H]).

Las categorías de impacto elegidas para este Análisis de Ciclo de Vida se presentan en la Tabla 10.

**Tabla 10. Categorías de Impacto elegidas para el ACV de la generación de energía eléctrica.**

CATEGORÍA DE IMPACTO	CATEGORÍA	UNIDAD DE LA CATEGORÍA	FACTOR DE CARACTERIZACIÓN
Cambio climático	CC	kg(CO <sub>2</sub> al aire)	Potencial de calentamiento global
Disminución de la capa de ozono	DO	kg (CFC-11 al aire)	Potencial de reducción de la capa de ozono
Toxicidad Humana	TH	kg(1, 4-DB al aire urbano)	Potencial de toxicidad humana
Acidificación Terrestre	AT	kg (SO <sub>2</sub> al aire)	Potencial de acidificación terrestre
Eutrofización de agua dulce	EAD	kg (P al agua dulce)	Potencial de eutrofización de agua dulce
Formación de oxidante fotoquímico	POF	kg(NMVOC al aire)	Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos
Agotamiento de agua	AA	m <sup>3</sup> (agua)	Potencial de agotamiento de agua
Agotamiento de recursos minerales	AM	kg (Fe)	Potencial de agotamiento de recurso mineral
Agotamiento de combustibles fósiles	AF	kg (Petróleo crudo)	Potencial de agotamiento de combustible fósil

### 3.5.2 Software utilizado

Para la realización de la evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV), se utilizó el software “SimaPro” versión 8.1 de PRé Consultants, mediante el uso de bases de datos de inventario propias, de referencias bibliográficas (Güereca y Juárez 2013) y de las bases de datos de Ecoinvent, BUWAL, IDEMAT, ETH, IVAM, la versión 8.1 contiene bases de datos mexicana que permiten acercarnos a la realidad del país y con ello mayor certeza en los impactos estimados.

### 3.5.3 Calidad y recolección de los datos.

Los datos para este estudio se han recopilado siguiendo los lineamientos establecidos por la norma ISO: 14044-:2006(ISO, 2006).

La construcción del inventario de ciclo de vida se con información proporcionada por investigadores que integran los proyectos de CEMIE-OCEANO y CEMIE-BIO que desarrollan las tecnologías. Específicamente para la energía Bio se empleó el software SuperPro Designer, para realizar el diseño

y modelado del sistema de generación de energía mediante bagazo de tequila. Por otro lado, para la energía undimotriz se proporcionó información detallada de las dimensiones de los dispositivos undimotrices propuestos, mientras que la información para los sistemas de almacenamiento de energía se tomó del estudio realizado por Güereca y Juárez (2013). Fue necesaria la revisión de artículos científicos (Yan, Et al, 2011) así como del uso de la base de datos de ACV Ecoinvent v3.1 para el proceso de algunos insumos.

## 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante este estudio, partiendo de la elaboración del inventario de ciclo de vida, seguido del análisis y la discusión de los impactos resultantes por categoría evaluada.

### 4.1 Inventario de ciclo de vida

Para reunir los datos que forman el inventario para el estudio comparativo, se realizó un inventario para cada tecnología de generación de energía eléctrica, esto debido a las diferencias entre los procesos de generación.

#### 4.1.1 Inventario de Energía Undimotriz

El compendio de información para estructurar el inventario en el caso de energía undimotriz se realizó con información proporcionada por grupo de “Desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de la energía del océano” del Instituto de Ingeniería de la UNAM, que encabeza el CEMIE-OCEANO.

Las etapas generales que se consideraron para la generación de energía eléctrica a partir de energía undimotriz fueron: Extracción de materias primas y construcción, generación de energía, almacenamiento y desmantelamiento de la planta.

A continuación se describen las etapas generales que se contemplaron para cada uno de los escenarios que serán analizados, así como los datos de inventario que se utilizaron para el análisis.

- **EXTRACCIÓN DE MATERIAS PRIMAS (EMP) Y CONSTRUCCIÓN**

Esta etapa incluye el material que utiliza para la construcción de la Central Undimotriz constituida por las estructuras mostradas en la tabla 11.

Tabla 11. Estructuras y material considerados en la etapa de “Extracción de Materia Prima y Construcción”

ESTRUCTURA	DESCRIPCIÓN
<b>Cimentación en el agua y muelle:</b>	Dimensión total (cimentación): longitud 20 m, ancho 5 m y alto 8 m desde el fondo (800 m <sup>3</sup> ) Material: Cemento, hierro, arena, grava y agua. Dimensión del muelle: longitud 20 m, ancho 5 m y grosor 0.7 m
<b>Sistema de Captación:</b>	Longitud de brazo 12 m; Peso del brazo: 2.3 t Diámetro de boya 4 m; Peso de boya: 2.3 t Materiales: acero inoxidable
<b>Sistema de conversión/generación:</b>	Dimensiones del contenedor: longitud 6m, ancho 2.4m y alto 2.5 m. Material de la coraza: Acero Peso:3.5 t

Los datos utilizados para modelar esta etapa se determinaron con base en la unidad funcional descrita anteriormente (Ver Tabla 12), en esta etapa la cantidad de materia prima será diferente en el caso de usar el prototipo 1 o el prototipo 2 de los dispositivos undimotrices, por la diferencia en cuanto a estructura, dentro de la construcción se considera la energía y/o combustible necesarios para realizar cada una de las actividades correspondientes a la construcción de cada una de las estructuras que se requieren para la central undimotriz, tomando en cuenta el transporte del material y considerando una distancia de 25 km (Distancia al pueblo más cercano en donde encontraremos el material). Así mismo se consideran los equipos requeridos durante la instalación de la planta.

Los datos empleados para la modelación de esta esta se muestran en la tabla 11, en la cual se pueden ver las cantidades totales de insumos necesarios durante el ciclo de vida de la planta undimotriz, así como las cantidades de insumos necesarios para obtener 1kWh de energía eléctrica (Unidad Funcional).

Tabla 12. Datos de Inventario para la etapa de EMP.

	ESTRUCTURA	MATERIALES	CANTIDAD TOTAL	CANTIDAD ESTIMADA PARA UNIDAD FUNCIONAL [1kWh]	UNIDAD DE MEDIDA	ESCENARIO	ESTRUCTURA	MATERIALES	CANTIDAD TOTAL	CANTIDAD ESTIMADA PARA UNIDAD FUNCIONAL [1kWh]	UNIDAD DE MEDIDA	
<b>BB-MA<sup>1</sup></b>	Cimentación	Cemento	307696.00	1.95E-04	Kg	<b>BP-MA<sup>3</sup></b>	Pilares	Cemento	27323251 2.00	1.73283E-05	kg	(De Gijt, 2016) (Serrano, 2016)
		Arena	1280.00	8.12E-07	Kg			Arena	1136636.0 0	7.2085E-08	kg	(De Gijt, 2016) (Serrano, 2016)
		grava	1312.00	8.32E-07	Kg			grava	1165048.0 0	7.38869E-08	Kg	(De Gijt, 2016) (Serrano, 2016)
		Agua	2461539.00	1.56E-07	m3			Agua	33000.00	2.09285E-08	m <sup>3</sup>	(De Gijt, 2016) (Serrano, 2016)
		Acero	365.72	2.32E-07	t			Acero	218584.00	1.38625E-08	t	(De Gijt, 2016) (Serrano, 2016)
	Boya articulada a brazo	Acero inoxidable	4600.00	2.9173E-06	kg		Boya en plataforma	Acero inoxidable	15986.00	1.9173E-06	kg	(Dina, 2015)
	Conversión	Contenedor de Acero	10500.00	6.34196E-10	[kg]		Conversión	Contenedor de Acero	10500.00	6.34196E-10	kg	(Dina, 2015)
		Tanque hidráulico	1.00	6.34196E-10	pz			Tanque hidráulico	1.00	6.34196E-10	pz	(Bonher SA de CV, 2014)
		Filtros de Retorno	3.00	1.90259E-09	pz			Filtros de Retorno	3.00	1.90259E-09	pz	(Bonher SA de CV, 2014)
		Filtro respiradero con coladera	4.00	1.26839E-08	pz			Filtro respiradero con coladera	4.00	1.26839E-08	pz	(Bonher SA de CV, 2014)
		Acumulador hidráulico ( 25Gals)	1.00	6.34196E-10	pz			Acumulador hidráulico ( 25Gals)	1.00	6.34196E-10	pz	(Bonher SA de CV, 2014)
		Generador trifásico de 100kw (	2.00	6.34196E-10	pz			Generador trifásico de 100kw (	2.00	6.34196E-10	pz	(Bonher SA de CV, 2014)
		Mini almacén	Explosivos	126.22	8.00E-08			kg	Mini almacén	Explosivos	126.22	8.00E-08
	Agua		8140.33	5.16E-06	m <sup>3</sup>		Agua	8140.33		5.16E-06	m3	(Güereca y Juárez, 2013)
	Volumen de tierra removida (Ensamblés)		363600.00	1.15E-04	m <sup>3</sup>		Volumen de tierra removida (Ensamblés)	363600.00		1.15E-04	m <sup>3</sup>	(Güereca y Juárez, 2013)

Superficie de lámina de impermeabilización (Higt Density Poliethylen with a bentonitic layer)	180000.00	<b>1.14E-04</b>	m <sup>2</sup>		Superficie de lámina de impermeabilización (Higt Density Poliethylen with a bentonitic layer)	180000.00	<b>1.14E-04</b>	m <sup>2</sup>	(Güereca y Juárez, 2013)
Combustible transporte por transporte de Explosivos	169.39	<b>1.07E-07</b>	tkm		Combustible transporte por transporte de Explosivos	169.39	<b>1.07E-07</b>	tkm	(Güereca y Juárez, 2013)
Combustible transporte por transporte de Agua	81.4	<b>5.16E-08</b>	tkm		Combustible transporte por transporte de Agua	81.40	<b>5.16E-08</b>	tkm	(Güereca y Juárez, 2013)
Superficie de obra de Desazolve Inferior	98.31	<b>1.87E-03</b>	m <sup>2</sup>		Superficie de obra de Desazolve Inferior	98.31	<b>1.87E-03</b>	m <sup>2</sup>	(Güereca y Juárez, 2013)
Excavación para toma de desazolve	792.74	<b>6.23E-08</b>	m <sup>3</sup>		Excavación para toma de desazolve	792.74	<b>6.23E-08</b>	m <sup>3</sup>	(Güereca y Juárez, 2013)
Concreto en Estructura Toma-desazolve	81.42	<b>5.03E-07</b>	m <sup>3</sup>		Concreto en Estructura Toma-desazolve	81.42	<b>5.03E-07</b>	m <sup>3</sup>	(Güereca y Juárez, 2013)
Acero de refuerzo en barras	6513.78	<b>5.16E-08</b>	kg		Acero de refuerzo en barras	6513.78	<b>5.16E-08</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Aceros con resistencia a la corrosión	82.00	<b>4.13E-06</b>	m		Aceros con resistencia a la corrosión	82.00	<b>4.13E-06</b>	m	(Güereca y Juárez, 2013)
Pintura para ductos	754.63	<b>5.20E-08</b>	m <sup>2</sup>		Pintura para ductos	754,63	<b>5.20E-08</b>	m <sup>2</sup>	(Güereca y Juárez, 2013)
Concreto de revestimiento en ducto	26.76	<b>4.79E-07</b>	m <sup>3</sup>		Concreto de revestimiento en ducto	26.76	<b>4.79E-07</b>	m <sup>3</sup>	(Güereca y Juárez, 2013)
Estructura de concreto prefabricado	26.91	<b>1.70E-08</b>	m <sup>3</sup>		Estructura de concreto prefabricado	26,91	<b>1.70E-08</b>	m <sup>3</sup>	

<b>BB-B<sup>2</sup></b>		Turbine Francis 12 Toneladas	1.00	<b>1.71E-08</b>	pz			Turbine Francis 12 Toneladas	1.00	<b>1.71E-08</b>	pz	(Güereca y Juárez, 2013)
	Cimentación	Cemento	307696.00	<b>1.95E-04</b>	Kg	BP-B <sup>4</sup>	Pilares	Cemento	273232512.00	<b>1.73283E-05</b>	Kg	(De Gijt, 2016) (Serrano, 2016)
		Arena	1280.00	<b>8.12E-07</b>	Kg			Arena	1136636.00	<b>7.2085E-08</b>	Kg	(De Gijt, 2016) (Serrano, 2016)
		grava	1312.00	<b>8.32E-07</b>	Kg			grava	1165048.00	<b>7.38869E-08</b>	Kg	(De Gijt, 2016) (Serrano, 2016)
		Agua	2461539.00	<b>1.56E-07</b>	m <sup>3</sup>			Agua	33000.00	<b>2.09285E-08</b>	m <sup>3</sup>	(De Gijt, 2016) (Serrano, 2016)
		Acero	365.72	<b>2.32E-07</b>	t			Acero	218584.00	<b>1.38625E-08</b>	t	(De Gijt, 2016) (Serrano, 2016)
	Boya articulada a brazo	Acero inoxidable	4600.00	<b>7.00E+00</b>	kg	Boya en plataforma	Acero inoxidable	15986.00	<b>7.00E+00</b>	kg	(De Gijt, 2016) (Serrano, 2016)	
	Conversión	Contenedor de Acero	10500.00	<b>1.60E-04</b>	kg	Conversión	Contenedor de Acero	10500.00	<b>1.60E-04</b>	kg	(Dina, 2015)	
		Tanque hidráulico	1.00	<b>1.52E-03</b>	pz		Tanque hidráulico	1.00	<b>1.52E-03</b>	pz	(Bonher SA de CV, 2014)	
		Filtros de Retorno	3.00	<b>3.04E-03</b>	pz		Filtros de Retorno	3.00	<b>3.04E-03</b>	pz	(Bonher SA de CV, 2014)	
		Filtro respiradero con coladera	4.00	<b>1.52E-03</b>	pz		Filtro respiradero con coladera	4.00	<b>1.52E-03</b>	pz	(Bonher SA de CV, 2014)	
		Acumulador hidráulico ( 25Gals)	1.00	<b>1.52E-03</b>	pz		Acumulador hidráulico ( 25Gals)	1.00	<b>1.52E-03</b>	pz	(Bonher SA de CV, 2014)	
		Generador trifásico de 100kw (	2.00	<b>3.04E-03</b>	pz		Generador trifásico de 100kw (	2.00	<b>3.04E-03</b>	pz	(Bonher SA de CV, 2014)	
		Batería	Material activo del cátodo	0.24	<b>4.64E-08</b>		kg	Batería	Material activo del cátodo	0.24	<b>4.64E-08</b>	kg
	Material activo del ánodo		0.16	<b>3.10E-08</b>	kg	Material activo del ánodo	0.16		<b>3.10E-08</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)	
	Lithium (Li)		0.01	<b>2.66E-10</b>	kg	Lithium (Li)	0.01		<b>2.66E-10</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)	
	Nickel (Ni)		0.00	<b>0.00E+00</b>	kg	Nickel (Ni)	0.00		<b>0.00E+00</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)	
	Cobalt (Co)		0.00	<b>0.00E+00</b>	kg	Cobalt (Co)	0.00		<b>0.00E+00</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)	
	Aluminum (Al)		0.00	<b>0.00E+00</b>	kg	Aluminum (Al)	0.00		<b>0.00E+00</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)	
	Oxygen (O)		0.12	<b>2.36E-08</b>	kg	Oxygen (O)	0.12		<b>2.36E-08</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)	

Iron (Fe)	0.00	<b>0.00E+00</b>	kg
Phosphorus (P)	0.00	<b>0.00E+00</b>	kg
Manganese (Mn)	0.11	<b>2.04E-08</b>	kg
Titanium (Ti)	0.00	<b>0.00E+00</b>	kg
Graphite (C )	0.16	<b>3.10E-08</b>	kg
Carbon	0.02	<b>4.38E-09</b>	kg
Binder	0.04	<b>7.04E-09</b>	kg
Cooper parts	0.14	<b>2.57E-08</b>	kg
Aluminum parts	0.13	<b>2.38E-08</b>	kg
Aluminum casin	0.09	<b>1.75E-08</b>	kg
Electrolyte solvent	0.12	<b>2.27E-08</b>	kg
Plastics	0.05	<b>8.56E-09</b>	kg
Steel	0.10	<b>1.90E-10</b>	kg
Thermal isulation	0.01	<b>2.28E-09</b>	kg
Electronic parts	0.00	<b>7.61E-10</b>	kg
Energía para extraer materiales	3325.00	<b>1.06E-04</b>	MJ
Transporte marítimo del barco a Hong-Kong a puerto progreso	750.00	<b>8.56E-06</b>	tkm
Transporte terrestre del puerto progreso a Tekax-	7001.00	<b>7.99E-08</b>	tkm

Iron (Fe)	0.00	<b>0.00E+00</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Phosphorus (P)	0.00	<b>0.00E+00</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Manganese (Mn)	0.11	<b>2.04E-08</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Titanium (Ti)	0.00	<b>0.00E+00</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Graphite (C )	0.16	<b>3.10E-08</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Carbon	0.02	<b>4.38E-09</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Binder	0.04	<b>7.04E-09</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Cooper parts	0.14	<b>2.57E-08</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Aluminum parts	0.13	<b>2.38E-08</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Aluminum casin	0.09	<b>1.75E-08</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Electrolyte solvent	0.12	<b>2.27E-08</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Plastics	0.05	<b>8.56E-09</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Steel	0.10	<b>1.90E-10</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Thermal isulation	0.01	<b>2.28E-09</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Electronic parts	0.00	<b>7.61E-10</b>	kg	(Güereca y Juárez, 2013)
Energía para extraer materiales	3325.00	<b>1.06E-04</b>	MJ	(Güereca y Juárez, 2013)
Transporte marítimo del barco a Hong-Kong a puerto progreso	750.00	<b>8.56E-06</b>	tkm	(Güereca y Juárez, 2013)
Transporte terrestre del puerto progreso a Tekax-	7001.00	<b>7.99E-08</b>	tkm	(Güereca y Juárez, 2013)

<sup>1</sup>**BB-MA**: Boya en brazo articulado con almacenamiento de energía en Mini almacén

<sup>2</sup>**BB-B**: Boya en brazo articulado con almacenamiento de batería de iones de litio.

<sup>3</sup>**BP-MA**: Boya en plataforma con almacenamiento de energía en Mini almacén.

<sup>4</sup>**BP-B**: Boya en plataforma con almacenamiento de batería de iones de litio



- **GENERACIÓN**

En la etapa de generación se cuantificaron todas las entradas y salidas de materia prima y/o energía con base en la unidad funcional, es decir, la cantidad de insumos necesarios para obtener 1kWh de energía eléctrica.

**Tabla 13. Datos de inventario para la etapa de generación.**

ENTRADA	CANTIDAD ESTIMADA PARA LA UNIDAD FUNCIONAL [1kWh]	UNIDAD	PROCESO	SALIDA	CANTIDAD ESTIMADA PARA LA UNIDAD FUNCIONAL [1kWh]	UNIDAD	FUENTE
<b>Aceite hidráulico</b>	0.00003044		<b>SISTEMA DE CONVERSIÓN</b>	Aceite hidráulico	0.00003044		(Bonher SA de CV, 2014)
<b>Aditivo</b>	0.0000304	L		Aditivo	0.0000304	L	(Bonher SA de CV, 2014)

En la siguiente tabla se muestra las cantidades de materia y energía en el sistema de almacenamiento durante la etapa durante la etapa de generación.

**Tabla 14. Datos de inventario para la etapa de almacenamiento.**

SISTEMA DE ALMACENAMIENTO			
Entra/Salida	Unidades	Cantidad estimada para la unidad funcional [1kWh]	FUENTE
<b>Agua almacenada</b>	m <sup>3</sup>	0.000521302	(Güereca y Juárez, 2013)
<b>Energía generada en el mini almacén (Salidas)</b>	kWh	0.000273973	(Güereca y Juárez, 2013)

- **DESMANTELAMIENTO**

En esta etapa se considera un desmantelamiento total de la planta así como un proceso de reciclaje de acero principalmente. Considerando los diferentes escenarios presentes, la cantidad de material será particular para cada caso.

Tabla 15. Datos de inventario para la etapa de desmantelamiento.

SISTEMA	SECCIÓN	MATERIAL	CANTIDAD ESTIMADA PARA LA UNIDAD FUNCIONAL (1KW DURANTE 10 AÑOS)	UNIDAD
Sistema de captación	Boya y brazo	Acero	2.9173E-09	t
Sistema de conversión/generación	Contendor (3 piezas)	Acero	6.65906E-09	t
Mini almacén	Estructura	Acero	4.20E-09	kg

#### 4.1.2 Inventario de Energía de Biomasa

En el caso de la evaluación de impactos de la energía generada a partir de biogás, el compendio de información para estructurar el inventario se realizó con información proporcionada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM Campus Juriquilla, dónde se realizaron simulaciones del sistema de generación de energía eléctrica a partir del software SuperPro Designer, Copyright 1996-Present, Intelligen, Inc. All rights reserved.

En el caso de la energía de biomasa se consideraron actividades desde extracción de materias primas, hasta disposición final, se consideró un sistema de generación de energía eléctrica a partir de biogás obtenido de bagazo y hojas de agave generado en la producción de tequila. A continuación se muestran los datos considerados para cada etapa.

- **EXTRACCIÓN DE MATERIAS PRIMAS (EMP)**

Esta etapa incluye el material que utiliza para la siembra del agave, considerando el porcentaje en masa que corresponde a los residuos del total de la planta de agave, así como el material necesario para la construcción de la planta.

Tabla 16. Datos de Inventario para la etapa de extracción de materias primas (proceso de siembra y cosecha) (Yan, Et al, 2011).

Siembra y cosecha de Agave	AGROQUÍMICOS	La tasa de aplicación (kg ha <sup>-1</sup> )	GEI (kg CO <sub>2</sub> E kg <sup>-1</sup> )	La tasa de aplicación (kg ha <sup>-1</sup> ) [1kWh]	GEI (kg CO <sub>2</sub> E kg <sup>-1</sup> ) [1kWh]
	Nitrógeno	600.00	11.00	1.18E-02	1.30E-01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	91.60	1.61	1.81E-03	2.91E-03	
K <sub>2</sub> O	289.20	0.71	5.70E-03	4.05E-03	
Lima	2294.00	0.51	4.52E-02	2.31E-02	
Herbicida	15.00	25.00	2.96E-04	7.40E-03	
Pesticida	1.08	29.00	2.13E-05	6.18E-04	
	Diésel combustible empleado (litros/ha)	GHG incorporado (kg CO <sub>2</sub> e ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Diésel combustible empleado (litros/ha) [1kWh]	GHG incorporado (kg CO <sub>2</sub> e ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) [1kWh]	
Maquinaria	550.1	41.83	0.01084833	0.45378549	

Tabla 17. Datos de inventario para etapa de EMP (Serrano, 2016; CEMIE-BIO).

MP	TRANSPORTE DE MP	DIÉSEL (l/AÑO)	CANTIDAD UNIDAD FUNCIONAL
			639625.00
Construcción-MP	<b>Material</b>	<b>Cantidades totales</b>	<b>Cantidad Unidad funcional [1kWh]</b>
	Cemento (kg)	5715.00	2.63E-01
	Arena (kg)	4.68	2.16E-04
	Agua (lt)	900.00	4.15E-02
	Block	30204878.00	1.39E-02
	Varilla (Ton)	0.48	2.19E-05
	<b>Equipos</b>	<b>Cantidad total (pz)</b>	<b>Cantidad Unidad funcional [1kWh]</b>
	Tornillo transportador	2.00	9.22E-05
	Reactor	1.00	4.61E-05
	Intercambiador de calor	2.00	9.22E-05
	Digestor anaerobio	1.00	4.61E-05
	Filtro rotatorio	1.00	4.61E-05
	Desfibradora	1.00	4.61E-05

- **CONSTRUCCIÓN**

En el caso de esta etapa se consideran los elementos necesarios para llevar a cabo las obras de construcción de la central eléctrica de biomasa.

Tabla 18. Datos de inventario para la etapa de construcción (Serrano, 2016).

	EQUIPOS	CANTIDAD DE COMBUSTIBLE ESTIMADA PARA LA UNIDAD FUNCIONAL [1kWh] (l)
	Construcción	Mezclador
Camión de volteo		1.64638E-08
Vibradoras		1.64638E-08
Pisones		1.64638E-08
Bomba de concreto		2.04277E-08
Grúas		2.04277E-08
Planta Eléctrica		2.04277E-08
Perforadora		2.82079E-09
Tractor arrastre empuje		2.82079E-09

- **GENERACIÓN**

Para esta etapa cuantifican las entras y salidas de materia y energía del sistema, considerando que algunas entradas retornan al sistema.

Tabla 19. Datos de inventario (entradas) para la etapa de generación (CEMIE-BIO).

ENTRADAS	UNIDADES	UNIDAD FUNCIONAL [1KWH]
Electricidad	kW-h/año	2.09
Vapor	MT/año	1.35E-04
Agua enfriamiento	MT/año	2.16E-01
Agua consumos (Reactores)	m <sup>3</sup> /d	7.20E-05
Agua consumo (Cogeneración-agua fresca)	kg/h	5.52
Aire	kg/h	3.13E-03
MP (Bagazo-hojas)	t/año	5.95E-03

Tabla 20. Datos de inventario (Salidas) para la etapa de generación (CEMIE-BIO).

TIPO DE EMISIONES	SALIDAS	UNIDADES	UNIDAD FUNCIONAL [1KWH]
Aire	CO <sub>2</sub>	kg/h	1.23E-03
Suelo	Cenizas	kg/h	1.94E-06
Agua	Agua Residual	m <sup>3</sup> /h	2.77E-06
	Ácido Acético	g/h	1.15E-07
	Ácido butírico	g/h	2.86E-08
	Glucosa	g/h	2.07E-06
a 46°C (0.1 bar)	condensados	kg/h	6.21E-02
a 278 °C (4.4 bar)	vapor baja presión	kg/h	4.35E-01
a 342 °C (13 bar)	vapor de alta presión	kg/h	1.93E-01

- **DESMANTELAMIENTO**

En esta etapa se considera un desmantelamiento total de la planta así como un proceso de reciclaje de material. Por lo cual se consideró como residuos de construcción.

#### 4.1.3 Inventario Energía convencional.

En el caso de la energía convencional, se realizó el análisis una revisión de artículos científicos así como del uso de la base de datos de ACV Ecoinvent v3.1 del módulo de Energía de Ecoinvent que representa el periodo de 2008-2014 para México.

## 4.2 Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida

En este apartado se analizan y discuten los resultados de la evaluación de impactos resultantes por categoría, así como las contribuciones porcentuales de las etapas consideradas en cada sistema de generación de energía eléctrica analizados.

En la tabla 21 se describen los procesos y componentes por etapa considerados para cada tipo de energía renovable

Tabla 21. Etapas del Ciclo de Vida para cada energía analizada.

TIPO DE ENERGÍA	ABREVIATURA	PROCESO	COMPONENTES DE ETAPA
Undimotriz	EMP y Construcción	Extracción de materias primas (EMP) para construcción del sistema de captación de energía cinética y potencial del movimiento de las olas del mar.	Materiales de construcción, diésel, lubricantes e instrumentación industrial.
	Generación	Generación de energía eléctrica	Insumos necesarios para el funcionamiento y residuos generados.
	Almacenamiento	Sistema de almacenamiento de energía eléctrica.	Insumos necesarios y salida de energía eléctrica.
	Desmantelamiento	Desmantelamiento de Central Undimotriz.	Residuos disponibles para reciclaje.
Biomasa	EMP	Extracción de materias primas (EMP) provenientes de la industria tequilera y para la construcción.	Materiales necesarios para poder obtener los residuos sólidos orgánicos del tequila que serán transformados.
	Construcción	Construcción de central eléctrica a partir de biogás generado de bagazo y hojas de agave generado en la producción de tequila.	Se consideran los insumos necesarios para la puesta en marcha de la central.
	Generación	Generación de energía eléctrica a partir de biogás generado de residuos tequileros.	Se consideran los insumos necesarios para la producción, así como las emisiones al aire, agua y suelo generados durante el proceso
	Desmantelamiento	Desmantelamiento de central de biomasa.	Residuos generados para la demolición de la planta y los aprovechables para reciclaje.

Todos los impactos ambientales analizados y descritos a continuación están referidos a la unidad funcional seleccionada, que es de 1kWh de energía eléctrica generada en un marco de tiempo de 10 años.

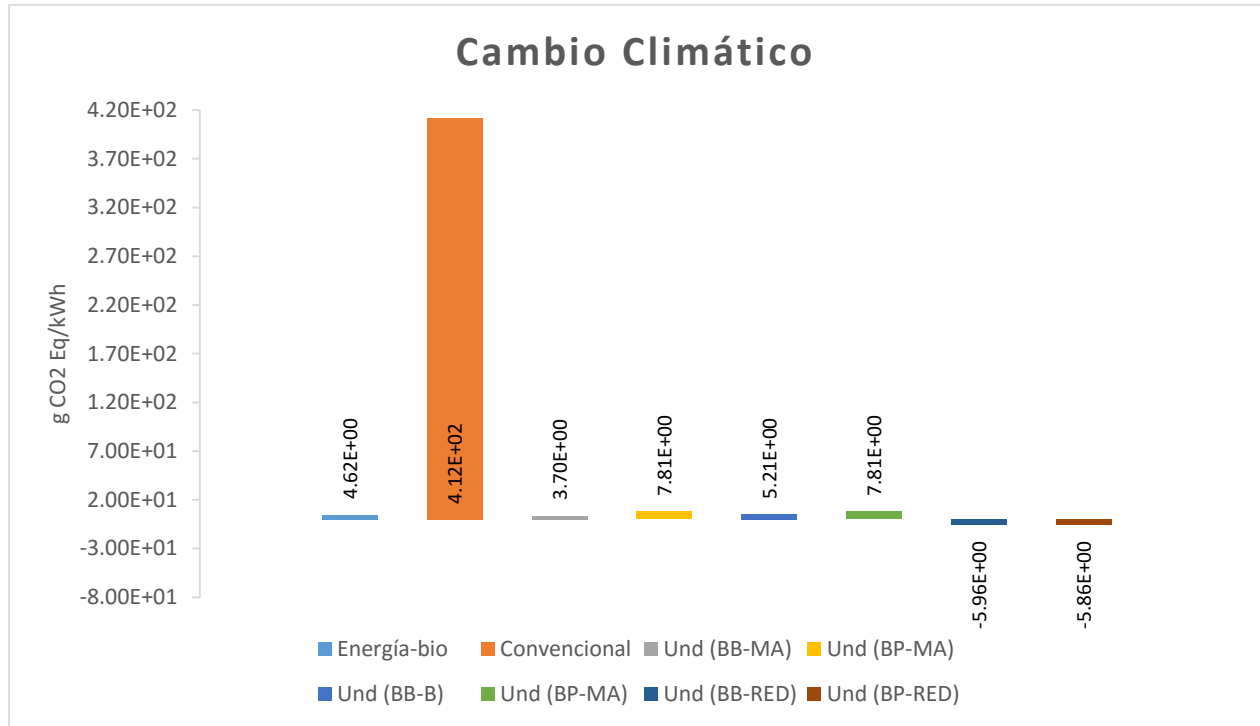
### 4.2.1 Impacto Global Impacto global Caracterizado

En la tabla 22 se concentran los impactos globales de cada escenario bajo estudio para cada categoría evaluada.

Tabla 22. Impactos generados y evitados de cada uno de los sistemas analizados.

CATEGORÍA DE IMPACTO	UNIDAD	ENERGÍA-BIO	CONVENCIONAL	UND (BB-MA)	UND (BP-MA)	UND (BB-B)	UND (BP-B)	UND (BB-Red)	UND (BB-Red)
Cambio climático	g CO2 eq/kWh	4.62E+00	4.12E+02	3.70E+00	7.81E+00	5.21E+00	4.65E+00	-5.96E+00	-5.86E+00
Agotamiento de la capa de ozono	g CFC-11 eq/kWh	5.23E-07	1.18E-05	7.05E-07	1.41E-07	4.72E-06	4.54E-06	-1.50E-05	-1.47E-05
Acidificación terrestre	g SO2 eq/kWh	2.98E-02	1.37E+00	9.92E-03	2.15E-02	3.31E-01	5.90E-03	-3.92E+00	-3.91E+00
Eutrofización de agua dulce	g P eq/kWh	9.34E-04	3.39E-03	6.38E-04	1.38E-03	4.60E-03	3.60E-03	-1.07E-01	-1.06E-01
Toxicidad humana	g 1,4-DB eq/kWh	1.06E+00	5.31E+00	1.19E-01	2.48E-01	1.21E+00	1.51E+00	-1.02E+01	-1.00E+01
Formación de oxidantes fotoquímicos	g NMVOC/kWh	1.69E-02	3.14E-01	1.46E-02	3.07E-02	1.60E-01	6.95E-03	-1.85E+00	-1.80E+00
Agotamiento de agua	m <sup>3</sup> /kWh	8.86E-04	6.97E-04	5.45E-04	5.69E-04	1.58E-04	1.33E-04	-1.71E-03	-1.61E-03
Agotamiento de recursos minerales	g Fe eq/kWh	2.38E-01	2.11E+00	4.07E-01	8.31E-01	2.59E-01	1.26E-01	-4.04E+00	-4.02E+00
Agotamiento de combustibles fósiles	g oil eq/kWh	1.70E+00	1.55E+02	4.20E-01	9.35E-01	1.70E+01	3.21E-01	-2.04E+01	-2.04E+01

En la figura 13 se pueden ver los impactos estimados para cada escenario evaluado en la categoría de cambio climático, observando que en el escenario de energía convencional el potencial de impacto es de 412g CO<sub>2</sub>/kWh que resulta ser la de mayor generación de impactos, mientras que las tecnologías undimotriz con red eléctrica presentan impactos evitados de -5.96 g CO<sub>2</sub>/kWh. El escenario bio presenta generación de impactos de 4.62g CO<sub>2</sub>/kWh



**Figura 13.** Gráfica que muestra los impactos ambientales generados y evitados, para cada uno de los sistemas analizados, en las categorías de Cambio climático.

En la tabla 23 se presenta una comparación de los impactos generados para cada escenario evaluados en la categoría de cambio climático respecto a lo reportado en literatura, se puede ver que la energía bio se encuentra dentro del rango reportado en literatura, las variaciones entre lo estimado en este estudio y lo reportado en literatura se debe a las consideraciones de los sistemas, por su parte Murphy, et al. (2016) analizan la obtención de energía eléctrica a partir de residuos forestales, astillas de madera, pellets de madera de la industria procesadora de madera y cultivos energéticos, esto desarrollado en Irlanda. Mientras que Tonini and Astrup (2012), realizan su estudio considerando la fracción de residuos orgánicos de los residuos sólidos urbanos, así como residuos de agricultura.

Por otro lado la energía convencional considera en este estudios (central de ciclo combinado), arroja resultados en la categoría de cambio climáticos similares a los reportados por Santoyo-Castelazo, et al. (2011).

Para energía undimotriz los resultados los 6 escenario evaluados oscilan entre -0.0586 g CO<sub>2</sub>Eq/kWh y 52g CO<sub>2</sub>Eq/kWh, estas diferencias se presentan por las consideraciones en el almacenamiento de la energía

eléctrica generada, Kelly, et al. (2012) y Uihlein and Magagna (2016) reportan resultados comparables con los escenarios evaluados, que consideran como sistema de almacenamiento una batería de iones de litio, sin embargo, los resultados de los escenarios que consideran como sistema de almacenamiento el mini almacén se encuentran con una diferencia mínima por debajo de los reportados en literatura, mientras que para los escenarios undimotriz con red eléctrica presentan impactos evitados, esto se atribuye a la consideración de que la energía generada se envía directo a la red eléctrica, sin embargo no se evalúa el sistema de red, porque lo que se minimizan los impactos del sistema.

**Tabla 23. Clasificación de las Energías Renovables (Mayorga, 2014).**

Escenario	Impacto en [g CO <sub>2</sub> Eq/kWh]	Reportado en literatura [g CO <sub>2</sub> Eq/kWh]	Referencia
ENERGÍA-BIO	4.62	0.6199	Murphy, et al., 2016.
		0.6227	
		0.8396	
		61.2-111.5	Tonini and Astrup, 2012.
CONVENCIONAL	412	446	Santoyo-Castelazo, et al., 2011.
UND (BB-MA)	3.7	50	Kelly, et al., 2012
UND (BP-MA)	7.81	23	Uihlein and Magagna, 2016
UND (BB-B)	52.1	30	
UND (BP-B)	46.5		
UND (BB-Red)	-5.96		
UND (BB-Red)	-5.86		

En las figuras 14 y 15 se muestran los impactos ambientales de las categorías de impacto evaluadas para cada escenario bajo estudio, observando que en 6 de las 8 categorías la energía convencional es la de mayores contribuciones, por otro lado se puede ver que los escenarios de energía undimotriz con baterías de iones de litio como sistema de almacenamiento, presentan considerables impactos, sobre todo en las categorías de Disminución de la capa de ozono, toxicidad humana y eutrofización de agua dulce.



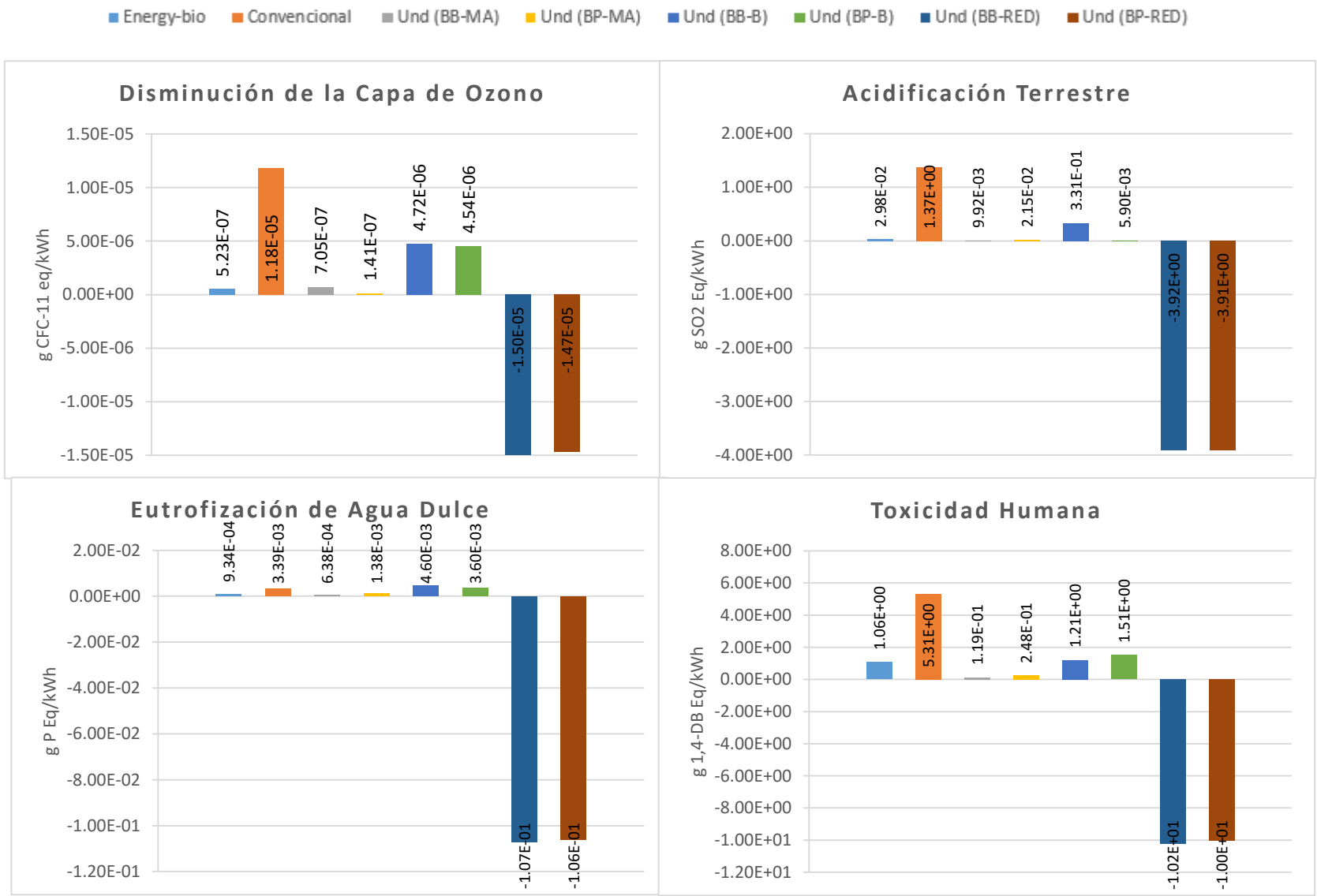


Figura 14. Gráficas que muestran los impactos ambientales generados y evitados, para cada uno de los sistemas analizados, en las categorías de Agotamiento de la capa de ozono, Acidificación terrestre, Eutrofización de agua dulce, Toxicidad humana.

■ Energy-bio ■ Convencional ■ Und (BB-MA) ■ Und (BP-MA) ■ Und (BB-B) ■ Und (BP-B) ■ Und (BB-RED) ■ Und (BP-RED)

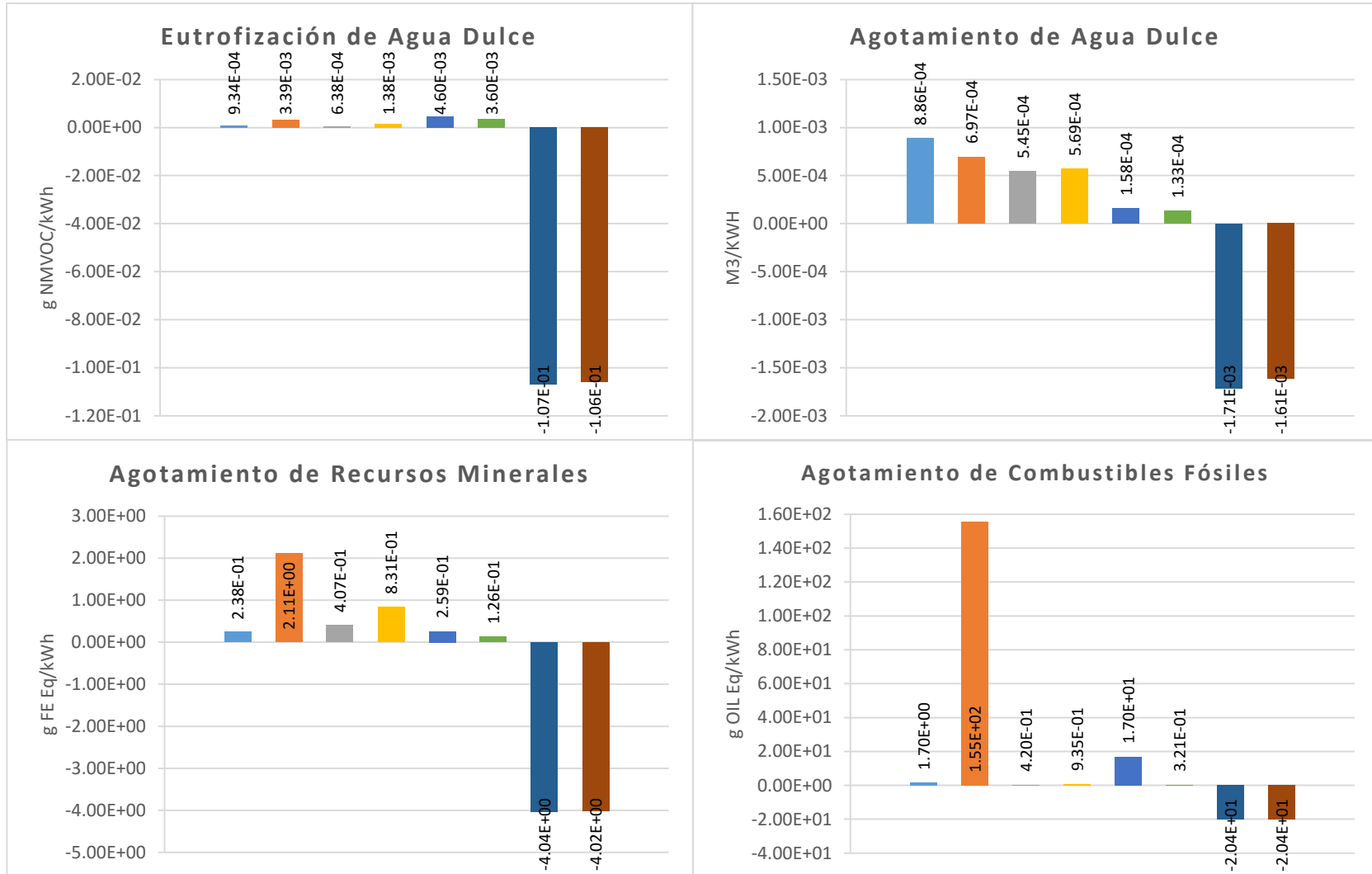


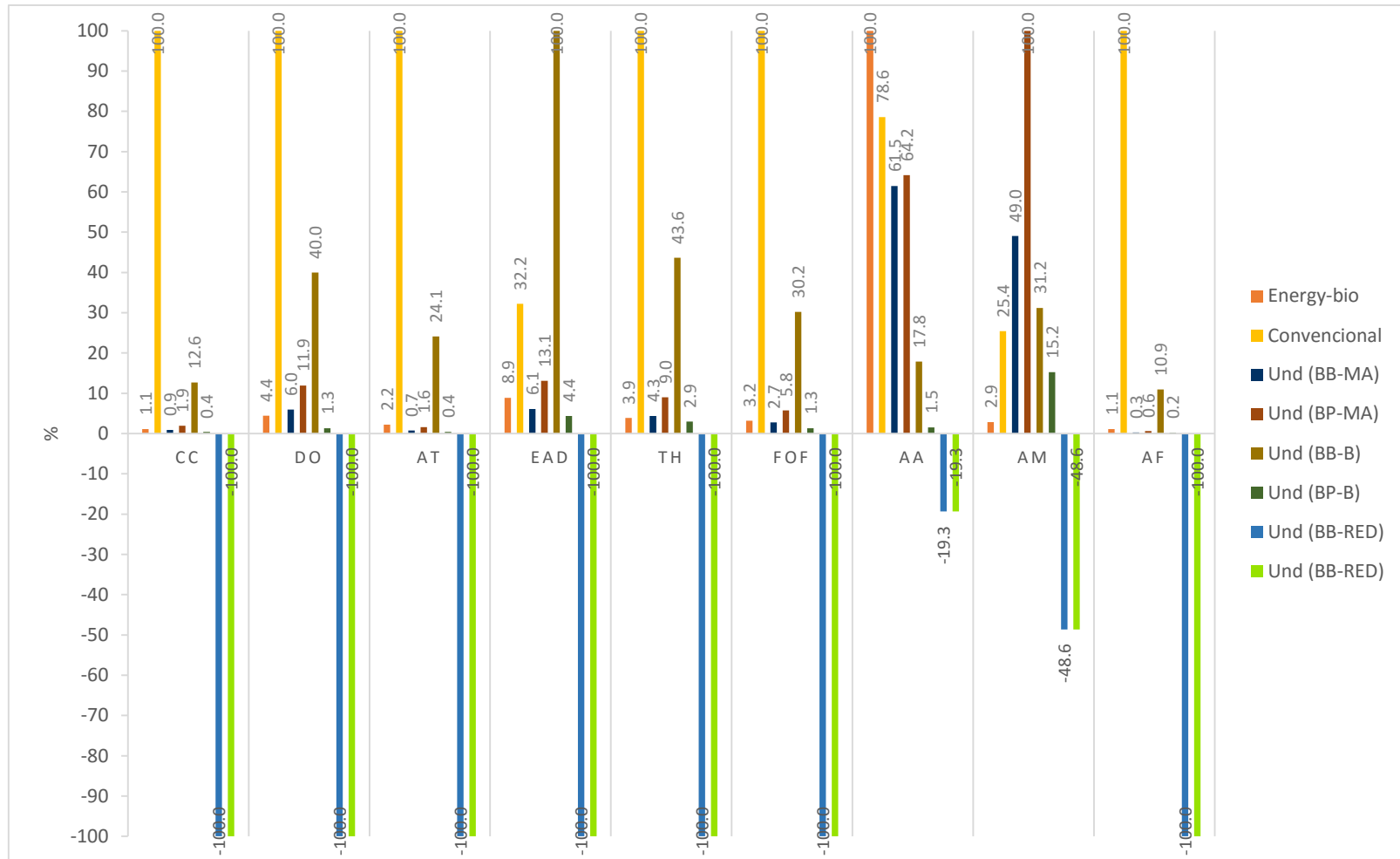
Figura 15. Gráficas que muestran los impactos ambientales generados y evitados, para cada uno de los sistemas analizados, en las categorías de Agotamiento de la capa de ozono, Acidificación terrestre, Eutrofización de agua dulce, Toxicidad humana.

#### **4.2.1.1 Impacto global Caracterizado**

La figura 16 representa los impactos ambientales generados y evitados para cada uno de los sistemas analizados. Los valores mostrados en la figura han sido normalizados con respecto al mayor impacto generado.

Aquí se puede observar que los sistemas de generación de energía undimotriz que mandan la energía a red presentan, en todas las categorías de impacto analizadas, impactos evitados; mientras que los sistemas de energía undimotriz que usan baterías de iones de litio como almacenamiento presentan mayores impactos en 8 de las 9 categorías analizadas. La energía undimotriz con mini almacén como sistema de almacenamiento evita la generación de impactos en 8 de las categorías analizadas, presentando altos impactos únicamente en la categoría de agotamiento de agua.

Por otro lado, la energía eléctrica a partir de biomasa presenta menor generación de impactos respecto a la energía convencional en 8 de las 9 categorías analizadas (ver figura 16), siendo la categoría de agotamiento de agua la única en la que la energía de biomasa presenta una mayor generación de impactos respecto a la convencional. Sin embargo es importante que esta modelación se ajuste de manera que se pueda cuantificar realmente la cantidad de electricidad de arranque, así como la cantidad de energía que será generada y poder obtener la energía que será realmente entregada, es decir, realizar un balance de energía para las etapas de arranque y estabilización de la planta.



**Figura 16. . Gráfica que muestra los impactos ambientales generados y evitados, para cada uno de los sistemas analizados. La figura presenta valores normalizados con respecto al mayor impacto generado**

**AA:** Agotamiento de agua; **AT:** Acidificación terrestre; **AM:** Agotamiento de recursos minerales; **CC:** Cambio climático; **DO:** Disminución de la capa de ozono; **EDA:** Eutrofización de agua dulce; **FOF:** Formación de oxidantes fotoquímicos; **TH:** Toxicidad humana.

## 4.2.2 Cambio Climático

### 4.2.2.1 Energía undimotriz

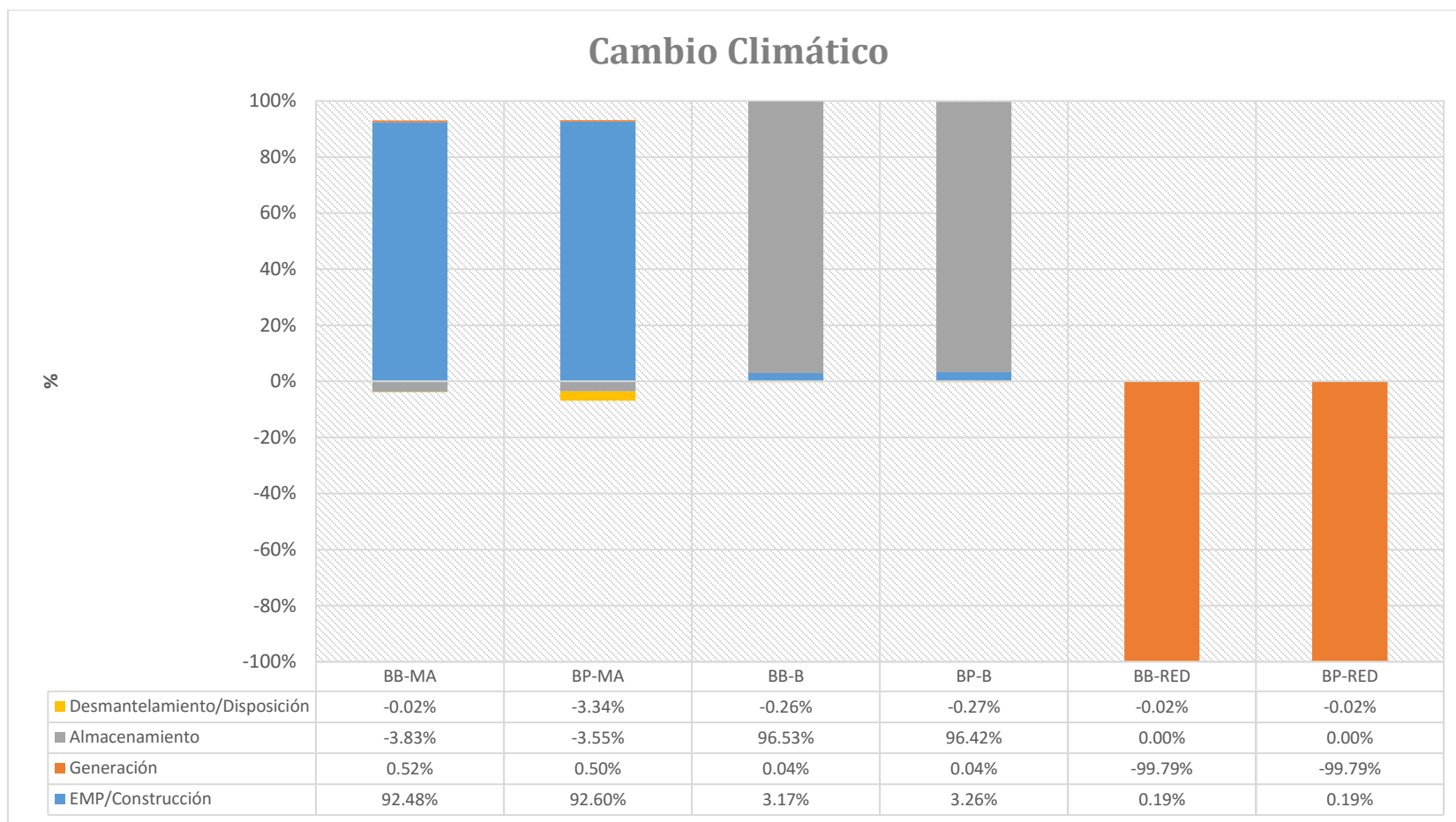
Los resultados globales de cambio climático para cada escenario evaluado de energía undimotriz se muestran en la tabla 23 en la cual se puede ver que los escenarios “BB-B” y “BP-B” son los que presentan un mayor potencial de cambio climático con 5.249E-02 kg de CO<sub>2</sub> eq/kWh y 5.093E-02 kg de CO<sub>2</sub> eq/kWh, respectivamente, en la etapa de almacenamiento, contribuyendo ambas con más de 96% del impacto global (Ver figura 17).

Esta alta contribución de impactos para dichos escenarios durante la etapa de almacenamiento se atribuye al uso de baterías de iones litio, ya que éstas tienen un periodo de vida de 3 años por lo tanto durante el periodo evaluado será necesario hacer cambio tres veces de estas baterías, mientras que en la etapa de construcción encontramos para estos escenarios potencial de cambio climático es de 1.724E-03 kg de CO<sub>2</sub> eq/kWh para “BB-B” y 3.964E-03 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh para “BP-B” es decir, alrededor del 3% de los impactos totales, esto se atribuye a que durante el proceso de fabricación de las baterías se requiere una cantidad importante de materia y energía que se ve reflejado en la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> que estos procesos generan.

Por otra parte, analizando los escenarios “BB-MA” y “BP-MA” se puede ver en la tabla 24 que la única etapa en la que hay un potencial de impacto es durante la construcción, con 3.974E-03kg CO<sub>2</sub> eq/kWh y 3.964E-03kg CO<sub>2</sub> eq/kWh respectivamente atribuyendo esto al material que se utilizado para la construcción de las instalaciones necesarias mostrando que para el escenario con la Boya articulada a un brazo el potencial de impacto es mayor, puesto que la construcción de la cimentación requiere un mayor uso de material que construir cuatro pilares para la Boya en Plataforma.

Tabla 24. Contribuciones a la categoría de cambio climático, valores totales por escenario para los sistemas de energía undimotriz.

Cambio Climático (CC) [kg CO <sub>2</sub> eq/kWh]					
Escenario Undimotriz	EMP/ Construcción	Generación	Almacenamiento	Desmantelamiento	Impacto Total
BB-MA	3.974E-03	2.150E-05	-1.584E-04	-1.434E-04	3.70E-03
BP-MA	3.964E-03	2.150E-05	-1.525E-04	-1.434E-04	7.81E-03
BB-B	1.724E-03	2.150E-05	5.249E-02	-1.434E-04	5.21E-02
BP-B	1.723E-03	2.150E-05	5.093E-02	-1.434E-04	1.65E-03
BB-RED	1.121E-03	-5.974E-01	-	-1.434E-04	-5.96E-02
BP-RED	1.120E-03	-5.974E-01	-	-1.434E-04	-5.86E-02



**Figura 17. Porcentajes de aportación por proceso para cada escenario para la categoría de Cambio Climático.**

#### 4.2.2.2 Energía de biomasa

En la categoría de cambio climático se puede ver en la figura 18 que la etapa con mayor contribución al impacto es la de generación, contribuyendo con 4.45E-03kg CO<sub>2</sub> eq/kWh, esto se atribuye principalmente a las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas durante esta etapa así como al uso de energía eléctrica. Por otra parte la etapa de extracción de materias primas (EMP) se generan 1.0E-4 kg de CO<sub>2</sub> eq/kWh, esto ocasionado principalmente por dos actividades una de ellas es que durante el cultivo del agave se usan fertilizantes y maquinaria que durante su construcción requieren quema de combustibles fósiles así como al momento de aplicación de los fertilizantes, la maquinaria requiere uso de diésel que durante su quema genera gases de efecto invernadero. Otra actividad altamente contribuyente en esta etapa es el transporte de la materia prima, ya que en este estudio se considera el requerimiento de camiones para el traslado del bagazo debido a su densidad. Estos resultados difieren de los obtenidos por Planchon, et al. (2016), donde se presentan impactos evitados para esta categoría, esto es porque el tipo de materia orgánica (maíz de ensilaje, estiércol de corral, remolacha azucarera, papas degradadas, cereales y hierba de césped) que analiza durante su estudio y no considera la etapa de construcción de planta. De esta manera sabemos que realizar una evaluación de impactos del ciclo de vida es muy específico del sitio ya que se consideran parámetros regionales e incluso específicos de sitio y puede haber una variación significativa entre diferentes configuraciones y su gestión en los sistemas de producción (Huttenen et al., 2014)

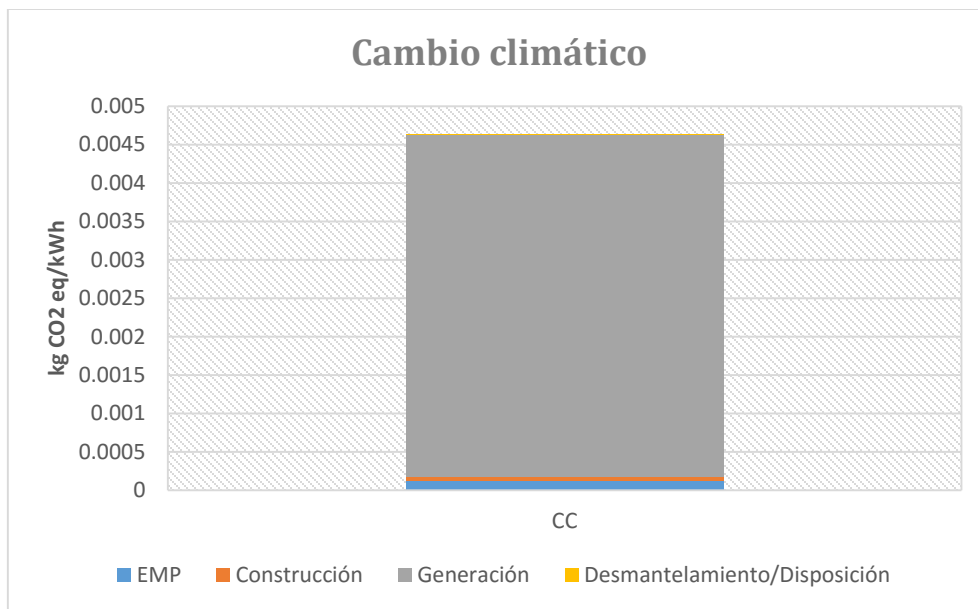


Figura 18. Contribuciones a la categoría de Cambio Climático por etapa del sistema bio.

### 4.2.3 Disminución de la Capa de Ozono

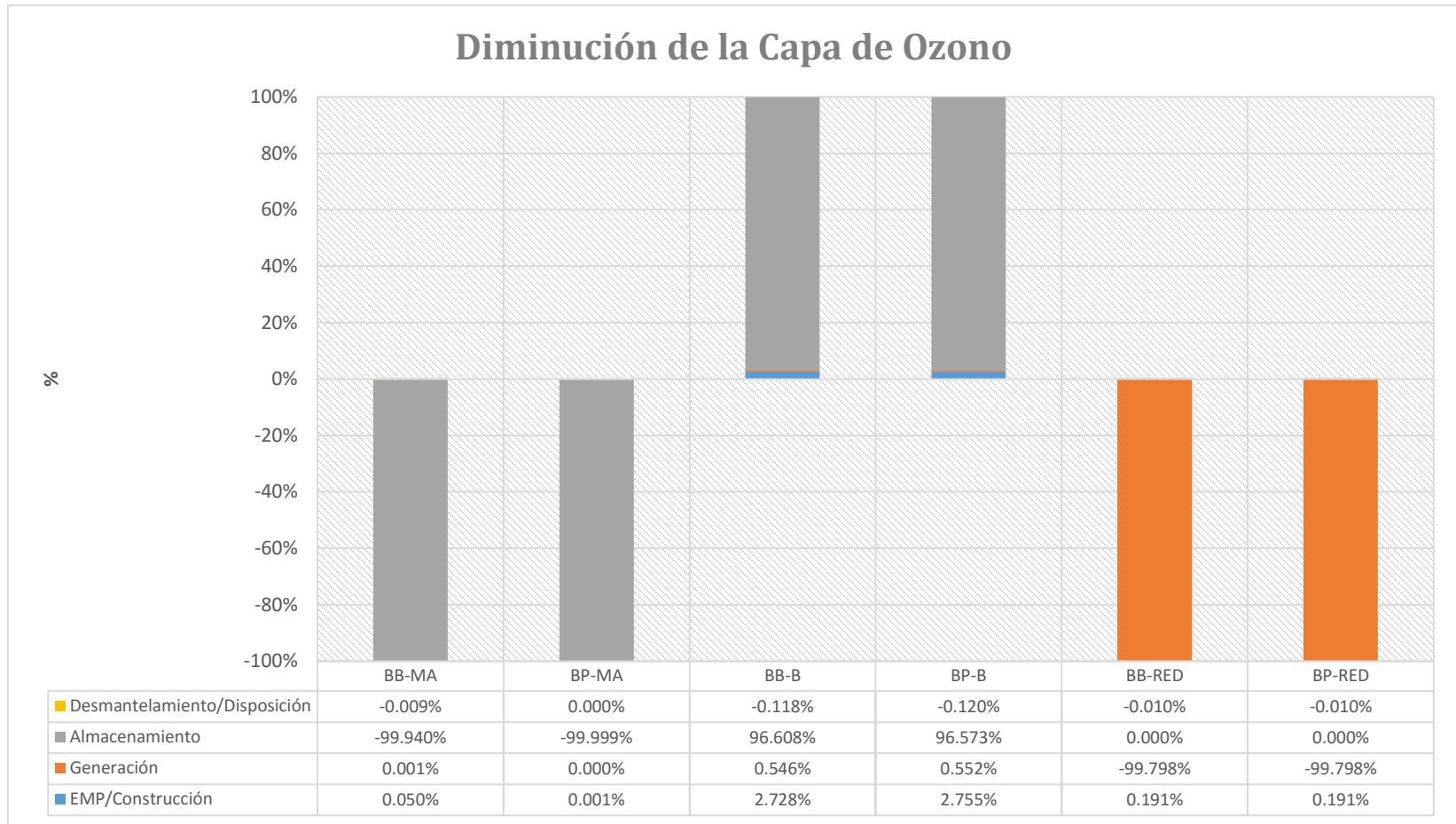
#### 4.2.3.1 Energía undimotriz

Esta categoría de impacto al igual que en la de cambio climático se puede observar en la tabla 25 que los escenarios con mayores potenciales de impacto global son “BB-B” y “BP-B” con 4.5820E-09 kg CFC-11 eq/kWh y 4.5352E-09 kg CFC-11 eq/kWh en la etapa de almacenamiento contribuyendo con un porcentaje mayor a 96% en ambos escenarios, esto se atribuye nuevamente al uso de baterías de iones de litio, específicamente por su fabricación ya que requiere una gran cantidad de energía, por lo que al usar energía proveniente de combustibles fósiles se generan altas emisiones de Clorofluorocarbonos causante del deterioro de la capa de ozono. Para los escenarios “BB-MA” y “BP-MA” la etapa con mayor contribución de impactos es la de construcción contribuyendo con menos de 1%, por lo que para esta categoría de impacto el uso de mini almacén es benéfico, ya que se logra tener un alto porcentaje de impactos evitados (ver figura 19)

Tabla 25. Contribuciones a la categoría de Capa de Ozono, valores totales por escenario para los sistemas de energía undimotriz.

Disminución de la Capa de Ozono (DO) [kg CFC-11 eq/kWh]					
Escenario Undimotriz	EMP/ Construcción	Generación	Almacenamiento	Desmantelamiento	Impacto Total
BB-MA	5.2453E-08	5.6512E-10	-1.0527E-04	-9.8040E-09	7.05E-10
BP-MA	6.9849E-10	2.5905E-11	-1.1500E-04	-5.6129E-12	1.41E-09
BB-B	1.2938E-10	2.5905E-11	4.5820E-09	-5.6129E-12	4.72E-09
BP-B	1.2940E-10	2.5905E-11	4.5352E-09	-5.6129E-12	1.54E-10
BB-RED	1.0569E-10	-5.5085E-08	-	-5.6129E-12	-5.50E-06
BP-RED	1.0569E-10	-5.5085E-08	-	-5.6129E-12	-5.47E-06





**Figura 19. Porcentajes de aportación por proceso para cada escenario para la categoría de Disminución de la Capa de Ozono.**

#### 4.2.3.2 Energía de biomasa

Se puede observar en la figura 20 que para esta categoría de impacto en la etapa de generación se presenta impactos de  $5.81E-10$  kg CFC-11 eq/kWh esto se debe principalmente a los requerimientos de electricidad, cuya generación produce CFC. La etapa de EMP genera un  $1.04E-10$  de CFC-11 eq/kWh para esta categoría atribuyendo esto al combustible necesario para el traslado de la materia prima y durante el proceso de siembra, ya que la generación de estos combustibles genera emisiones de CFC. Los resultados para esta categoría de impacto pueden variar respecto a los obtenidos en otros estudios, principalmente por la producción y transporte de materias primas, en el caso de Bacenetti (2016) obtiene mayores contribuciones para la categoría de disminución de la capa de ozono en plantas alimentadas con ensilaje de cereales y las pérdidas de metano.

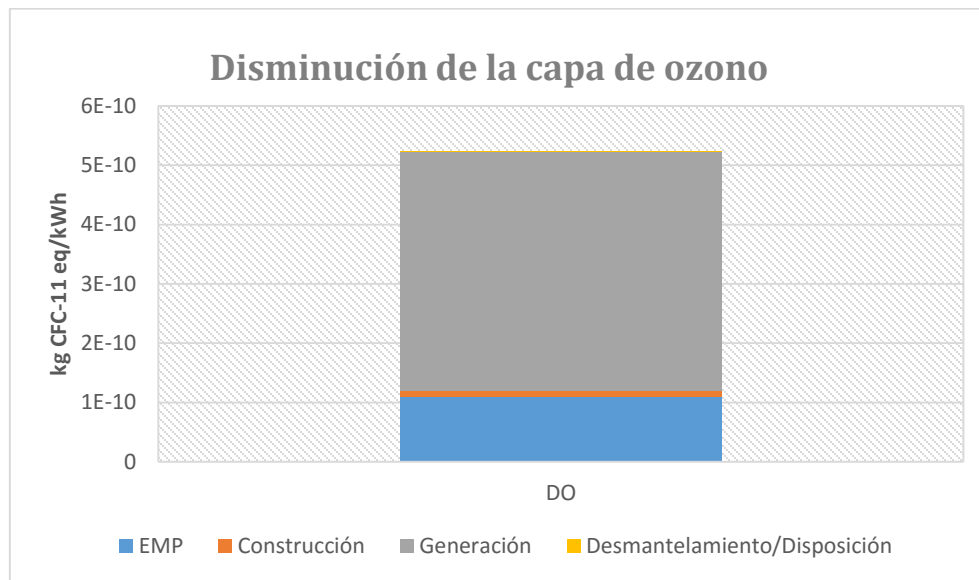


Figura 20. Contribuciones a la categoría de Disminución de la Capa de Ozono

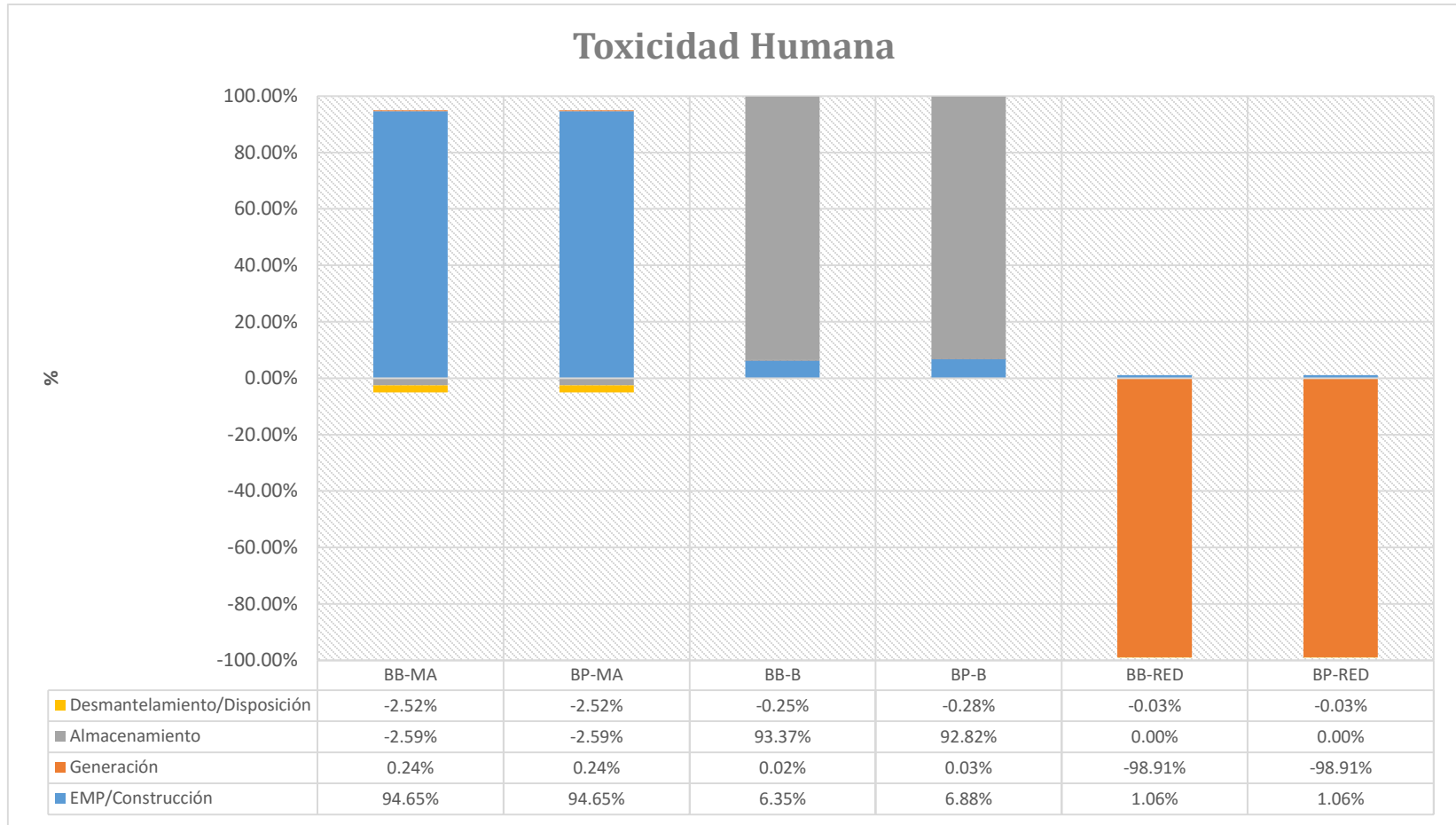
#### 4.2.4 Toxicidad Humana

Para la categoría de toxicidad humana se puede observar en la tabla 26 que para los escenarios que requieren uso de red eléctrica presentan impactos negativos para dos de las categorías evaluadas (generación y desmantelamiento) esto por la salida de energía eléctrica durante la generación y el reciclaje de materiales durante la etapa de desmantelamiento/disposición, esto mismo ocurre para los escenarios con mini-almacén (“BB-MA” Y BP-MA”), ya que la energía que se requieren proporcionalmente a lo largo de su vida útil es menor comparada con el uso de baterías. El uso de baterías presenta un alto potencial de impacto en esta categoría debido al uso de diferentes metales como cobalto y níquel durante su fabricación, siendo estos tóxicos para la salud humana.

**Tabla 26. Contribuciones a la categoría de Toxicidad Humana, valores totales por escenario para los sistemas de energía undimotriz.**

<b>Toxicidad Humana (TH) [1,4-DB eq/kWh]</b>					
<b>Escenario Undimotriz</b>	<b>EMP/ Construcción</b>	<b>Generación</b>	<b>Almacenamiento</b>	<b>Desmantelamiento</b>	<b>Impacto total</b>
<b>BB-MA</b>	5.2453E-08	5.6512E-10	-1.0527E-04	-9.8040E-09	1.19E-03
<b>BP-MA</b>	6.9849E-10	2.5905E-11	-1.1500E-04	-5.6129E-12	2.48E-03
<b>BB-B</b>	1.2938E-10	2.5905E-11	4.5820E-09	-5.6129E-12	1.21E-02
<b>BP-B</b>	1.2940E-10	2.5905E-11	4.5352E-09	-5.6129E-12	8.15E-04
<b>BB-RED</b>	1.0569E-10	-5.5085E-08	-	-5.6129E-12	-1.02E-02
<b>BP-RED</b>	1.0569E-10	-5.5085E-08	-	-5.6129E-12	-1.00E-02

Se puede ver en la figura 18 que para esta categoría de impacto la etapa con mayor contribución es la de construcción en los escenarios “BB-MA” y “BP-MA”, contribuyendo con un porcentaje mayor a 94% en ambos escenarios, atribuyendo estos impactos al material de construcción, así como a las actividades de esta etapa.



**Figura 21. Porcentajes de aportación por proceso para cada escenario para la categoría de Toxicidad Humana.**

#### 4.2.4.1 Energía de biomasa

Para esta categoría de impacto la etapa de generación presenta un potencial de impacto  $9.91E-04$  kg de  $CO_2$  eq/kWh, los impactos determinados son generados por las descargas de algunos compuestos orgánicos en las descargas de agua residual y a la energía eléctrica requerida durante esta etapa, por otro lado la etapa de EMP presenta un potencial de impacto  $2.59E-05$  1,4-DB eq/kWh que representa a los impactos atribuidos al uso de fertilizantes, herbicidas y pesticidas durante la siembra, así como a los materiales de construcción de la planta, como el cemento y el acero. Los impactos producidos durante la etapa de generación dependerán mucho del sistema tecnológico para la digestión anaerobia, es decir para la infraestructura implementada para la obtención del biogás (Bacenetti, 2016)

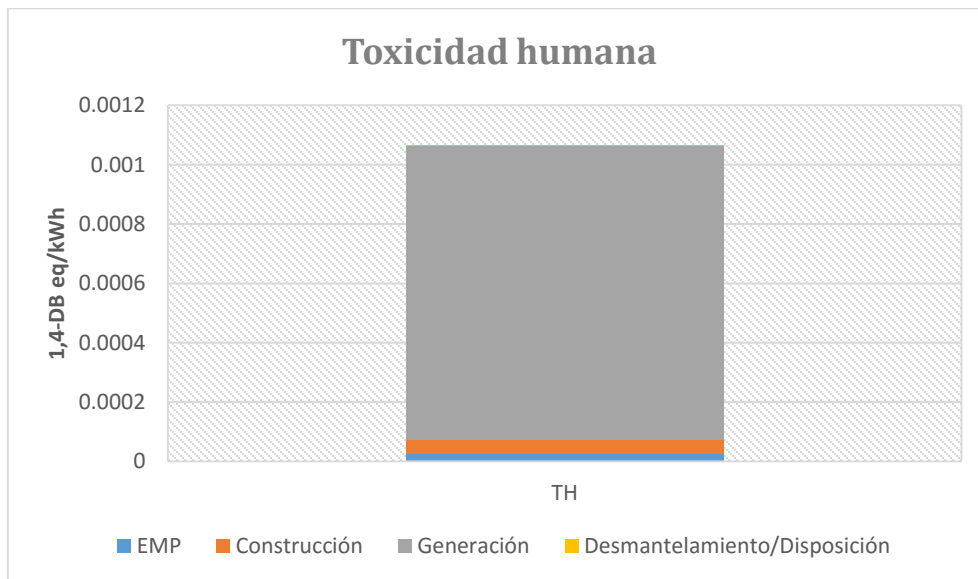


Figura 22. Contribuciones a la categoría de Toxicidad Humana por etapa del sistema bio.

## 4.2.5 Acidificación Terrestre

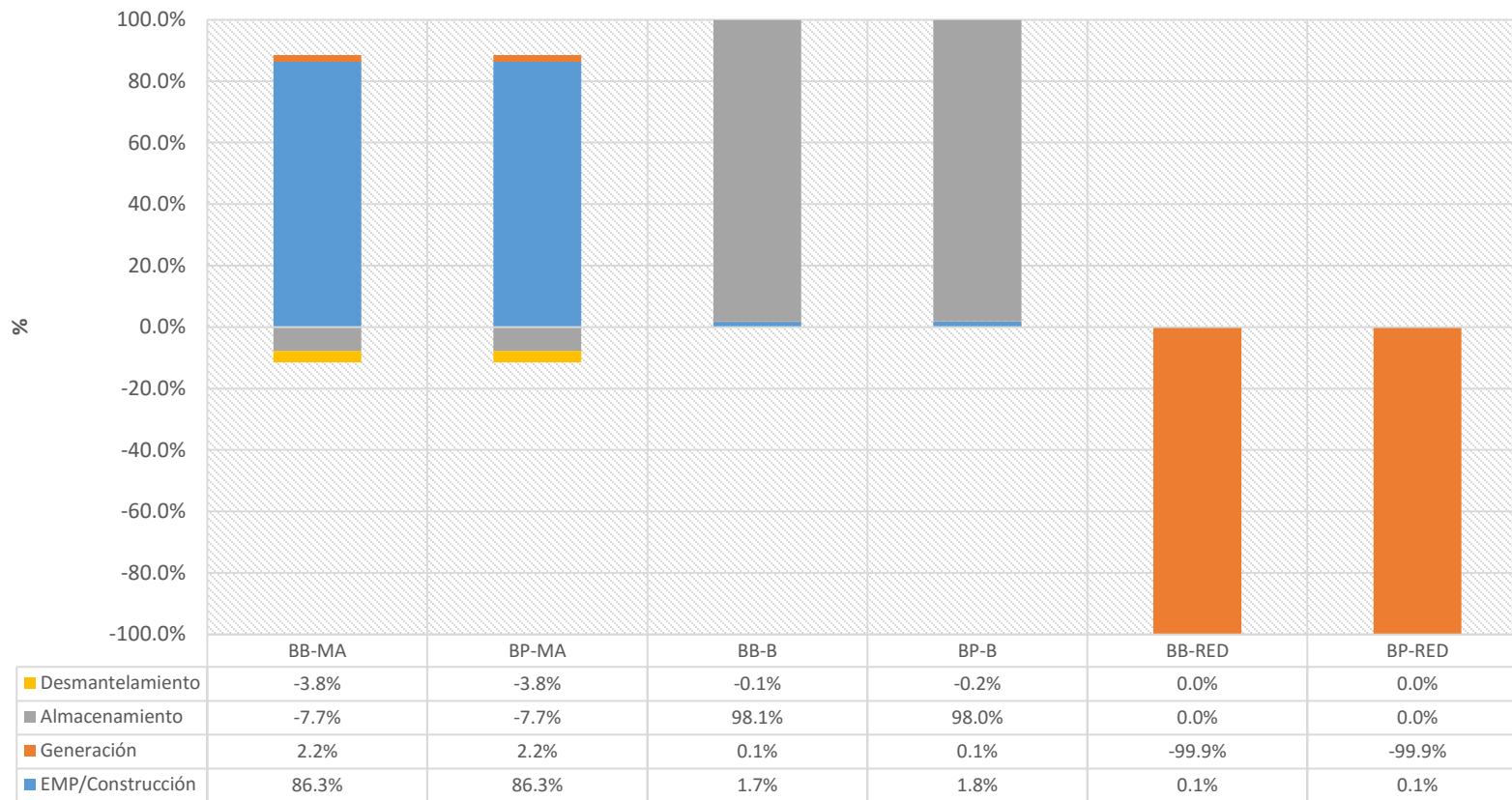
### 4.2.5.1 Energía undimotriz

La acidificación se genera por combinación de compuestos como NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub> con la humedad que generan precipitaciones ácidas, afectando el suelo, aguas superficiales, aguas subterráneas, organismos vivos y también edificaciones. Los resultados de ACV muestran (Ver tabla 27) que los escenarios que usan baterías son lo que generan mayores impactos, esto se atribuye a la cantidad de baterías requeridas a lo largo de 10 años de producción (esto es la etapa de generación), mientras que en la etapa de EMP/construcción para las baterías se requieren químicos, metales y electricidad, que generan emisiones durante su producción.

Tabla 27. Contribuciones a la categoría de Acidificación Terrestre, valores totales por escenario de energía undimotriz.

Acidificación Terrestre (AT) [kg SO <sub>2</sub> eq/kWh]					
Escenario Unidmotriz	EMP/ Construcción	Generación	Almacenamiento	Desmantelamiento	Impacto total
BB-MA	1.11167E-05	2.85415E-07	-9.948E-07	-4.86808E-07	9.92E-06
BP-MA	1.11112E-05	2.85415E-07	-9.9525E-07	-4.86808E-07	2.15E-05
BB-B	5.77728E-06	2.85415E-07	0.0003353	-4.86808E-07	3.31E-04
BP-B	5.77982E-06	2.85415E-07	0.0003153	-4.86808E-07	5.90E-06
BB-RED	4.73916E-06	-0.00392359	-	-4.86808E-07	-3.92E-03
BP-RED	4.73916E-06	-0.00392359	-	-4.86808E-07	-3.91E-03

## Acidificación Terrestre



**Figura 23. Porcentajes de aportación por proceso para cada escenario en la categoría de Acidificación Terrestre.**

#### 4.2.5.2 Energía de biomasa

Los impactos generados en la categoría de acidificación terrestre son principalmente provocados por la etapa de generación con un potencial de impacto de  $2.8668 \times 10^{-5}$  kg SO<sub>2</sub> eq, debido al uso de energía eléctrica requerida por los equipos instalados, mientras que la etapa de EMP presenta un menor potencial de generación con  $1.03708 \times 10^{-6}$  kg SO<sub>2</sub> eq/kWh estos impactos principalmente atribuibles al uso de fertilizantes nitrogenados y el transporte de la materia prima, asociados a la quema de combustibles fósiles para llevar a cabo las actividades. En Lordan et al. (2016) se estiman  $1.20 \times 10^{-3}$  kg de SO<sub>2</sub> eq/kWh quien atribuye estos impactos al almacenamiento, transporte y difusión del digestato, debido principalmente a las emisiones de NH<sub>3</sub> al aire, sus resultados son mayores que los obtenidos en este estudio, principalmente por la diferencia del uso de diferentes materias primas y las cadenas de valor consideradas de cada sistema.

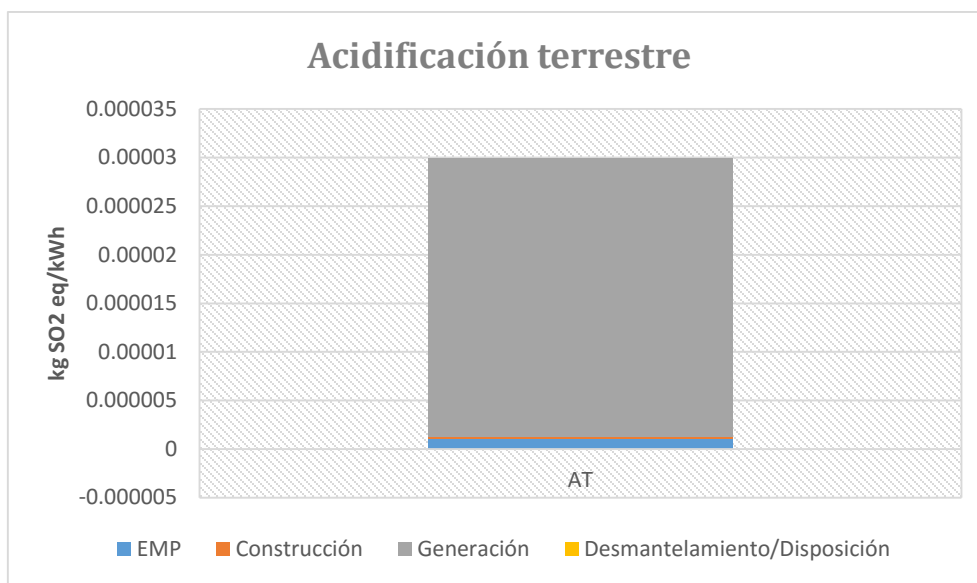


Figura 24. Contribución a la categoría de Acidificación Terrestre por etapa del sistema bio



## 4.2.6 Eutrofización de Agua Dulce

### 4.2.6.1 Energía undimotriz

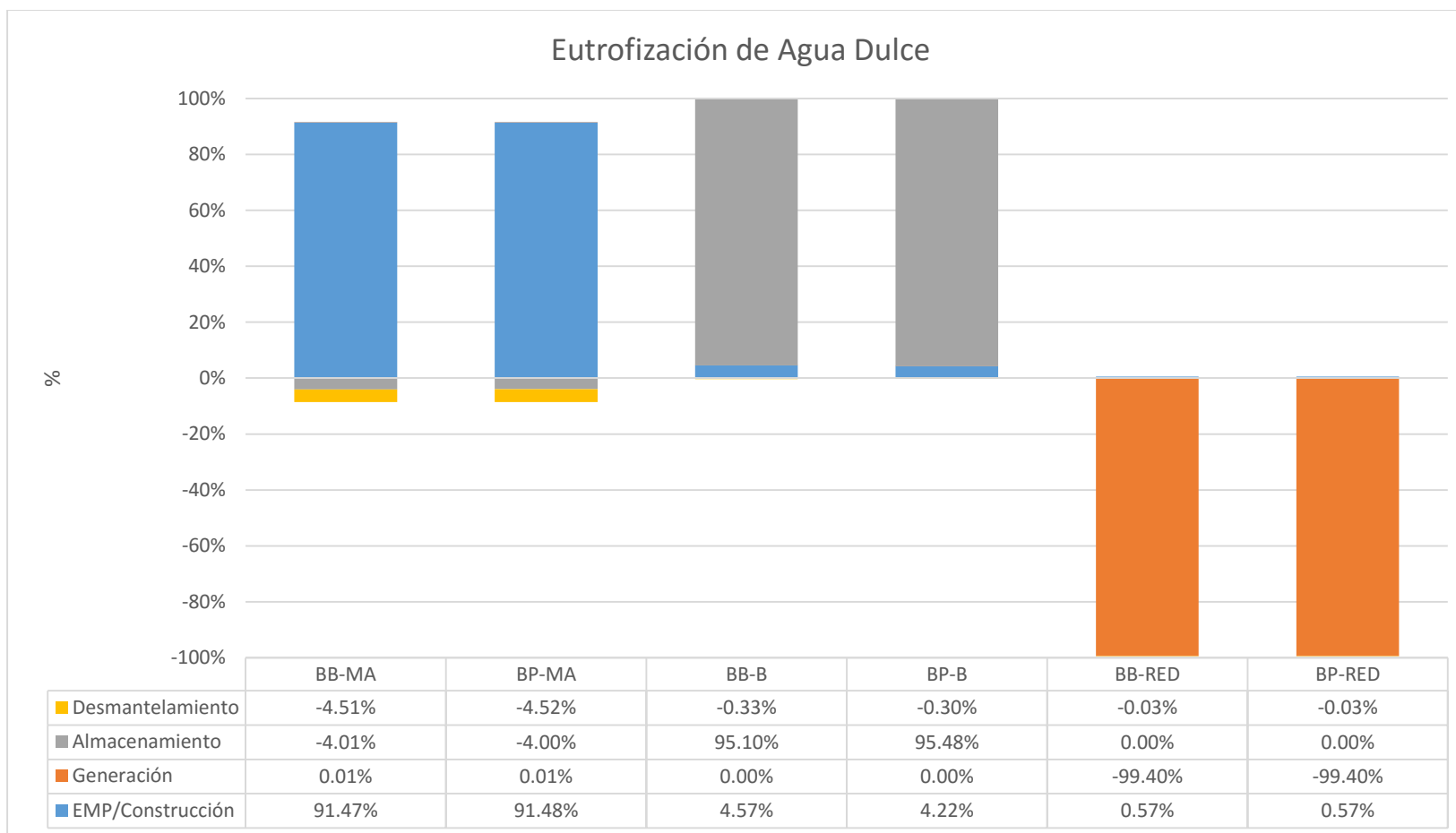
La eutrofización incluye los impactos potenciales de niveles excesivamente altos de macronutrientes, como el nitrógeno y los fosfatos. El enriquecimiento de nutrientes puede generar un cambio indeseable en la composición de especies y por lo tanto en la producción de biomasa, tanto a nivel acuático como terrestre, provocando la contaminación de las aguas para consumo y el incremento de la producción de biomasa, lo cual conduce a un incremento de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) (Güereca L. y C. Juárez, 2013)

Se puede observar en la gráfica de la figura 25 que en los escenarios con uso de baterías se muestra un mayor potencial de eutrofización, esto por la cantidad de baterías en la etapa de almacenamiento, mientras que para la etapa de construcción se atribuye a la fabricación de las mismas.

En el caso de los escenarios con mini-almacén “BB-MA” y “BP-MA” presenta potencial de eutrofización durante la etapa de EM/construcción  $7.0319\text{E-}07\text{kg P eq/kWh}$  y  $7.0300\text{E-}07\text{kg P eq/kWh}$  respectivamente, con lo que se puede observar que al presentar la boya articulada a un brazo representa un mayor potencial de eutrofización que el tener la boya en plataforma, esto se atribuye a que la boya articulada a un brazo requiere un mayor consumo de energía y combustibles, los cuales durante el proceso de refinación del crudo generan descargas de fosfatos al agua.

Tabla 28. Contribuciones a la categoría de Eutrofización de Agua Dulce, valores totales por escenario de energía undimotriz

Eutrofización de Agua Dulce [kg P eq/kWh]					
Escenario Undimotriz	EMP/ Construcción	Generación	Almacenamiento	Desmantelamiento	Impacto Total
BB-MA	7.0319E-07	4.8691E-11	-3.0812E-08	-3.4703E-08	6.38E-07
BP-MA	7.0300E-07	4.8691E-11	-3.0733E-08	-3.4703E-08	1.38E-06
BB-B	4.8484E-07	4.8691E-11	1.0078E-05	-3.4703E-08	1.05E-05
BP-B	4.8493E-07	4.8691E-11	1.0967E-05	-3.4703E-08	4.60E-07
BB-RED	6.1431E-07	-1.0767E-04		-3.4703E-08	-1.07E-04
BP-RED	6.1431E-07	-1.0767E-04		-3.4703E-08	-1.06E-04



**Figura 25. Porcentaje de aportación por proceso para cada uno de los sistemas para la categoría de Eutrofización de Agua Dulce**

#### 4.2.6.2 Energía de biomasa

La etapa de generación es la etapa que presenta mayores contribuciones en esta categoría de impacto se presenta un potencial de impacto del  $8.88215E-07$  kg P eq/kWh (ver figura 26), impactos atribuidos principalmente al consumo eléctrico, mientras que con un potencial de impacto de  $1.80258E-08$  kg P eq/kWh la etapa de EMP también contribuye en estos impactos atribuidos principalmente al uso de fertilizantes y las descargas de fosfatos al agua por el usos de estos.

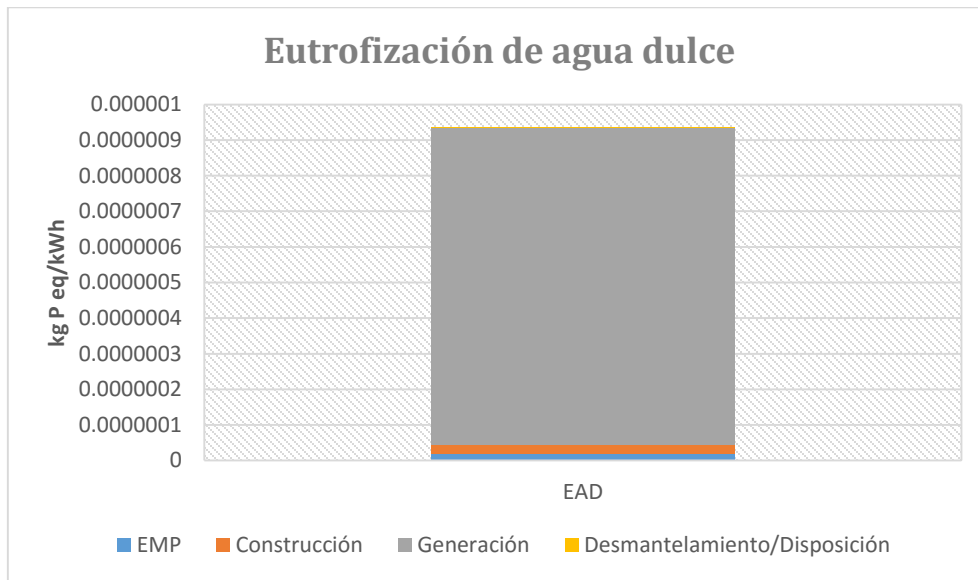


Figura 26. Contribuciones a la categoría de Eutrofización de Agua Dulce por etapa del sistema bio.

## 4.2.7 Formación de Oxidantes Fotoquímicos

### 4.2.7.1 Energía undimotriz

La formación de oxidante fotoquímicos se refiere a la mala calidad del aire, lo cual puede afectar negativamente a la salud humana. En esta categoría interviene contaminantes primarios como CO, Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>. La evaluación de los impactos en la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos muestra que usar mini-almacén como forma de almacenamiento representa menor potencial de impacto de formación de oxidantes fotoquímicos comparada al uso de mini-almacén y red eléctrica (Güereca L. y C. Juárez, 2013).

Durante la etapa de almacenamiento para los escenarios “BB-B” Y “BP-B”, se debe al uso de la batería y a la cantidad que se requiere durante los 10 años de funcionamiento, mientras que para los escenarios “BB-MA”, “BB-B” y “BB-RED” los impactos generados en la etapa de construcción se presenta mayor potencial de formación de oxidante fotoquímicos que en los escenarios “BP-MA”, “BP-B” y “BP-RED”, se atribuye esto al sistema de captación de energía cinética y potencial de las olas, es decir a la construcción de la boya, cuando se presenta la boya articulada a un brazo se tiene un mayor potencial que la boya en plataforma, esto relacionado con los requerimientos de electricidad en la construcción de la infraestructura, así como los combustibles utilizados en esta etapa. Para los escenarios BB-MA, BP-MA, BB-RED Y BPRED, se presenta impactos evitados, es decir, debido a que con este sistema se genera energía eléctrica para México, evitando generación de energía de manera convencional, lo cual implica que se dejan de usar combustibles fósiles.

Tabla 29. Contribuciones a la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos, valores totales por escenario de energía undimotriz.

Formación de Oxidantes Fotoquímicos (FOF) [kg NMVOC/kWh]					
Escenario Undimotriz	EMP/ Construcción	Generación	Almacenamiento	Desmantelamiento	Impacto total
BB-MA	1.55115E-05	1.1313E-07	-4.6912E-07	-5.85141E-07	1.46E-05
BP-MA	1.55069E-05	1.1313E-07	-4.6933E-07	-5.85141E-07	3.07E-05
BB-B	7.26915E-06	1.1313E-07	0.0001536	-5.85141E-07	1.60E-04
BP-B	7.27125E-06	1.1313E-07	0.0001524	-5.85141E-07	6.95E-06
BB-RED	5.88687E-06	-0.001859611	-	-5.85141E-07	-1.85E-03
BP-RED	5.88687E-06	-0.001859611	-	-5.85141E-07	-1.80E-03

## Formación de Oxidantes Fotoquímicos

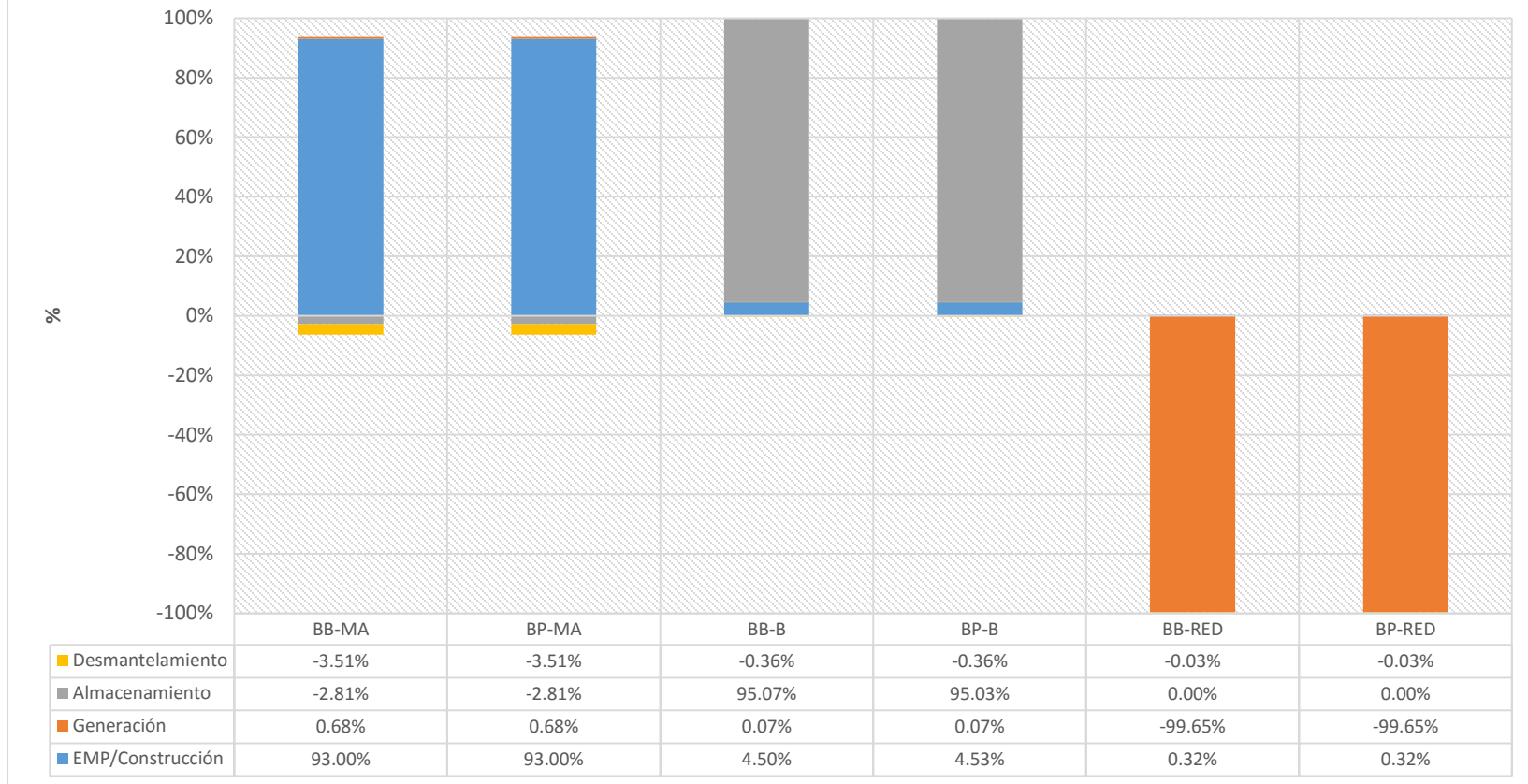


Figura 27. Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario para la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos

#### 4.2.7.2 Energía de biomasa

La categoría de formación de oxidantes fotoquímicos se puede observar en la figura 28 que la etapa con mayor contribución de impactos es la etapa de generación registrando un.  $1.59105E-05$ kg NMVOC/kWh, atribuyendo estos impactos al uso de fertilizantes, pesticidas, herbicidas y maquinaria durante el cultivo generando emisiones de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , CO y  $\text{NH}_3$  los cuales contribuyen a la generación de oxidantes fotoquímicos con el ozono estratosférico, no obstante el uso de hidrocarburos durante la parte de distribución de materia prima es también forma parte de las contribuciones de impacto en esta categoría durante esta etapa. Bacenetti et al. (2016) reporta que la producción, transporte de materias primas, las pérdidas de metano y las emisiones durante la digestión anaerobia son las principales actividades de contribución es esta categoría de impacto, mientras que las infraestructuras juegan un papel menor, de esta manera los resultados obtenidos en el presente estudio muestran una tendencia similar a otros estudios realizados.

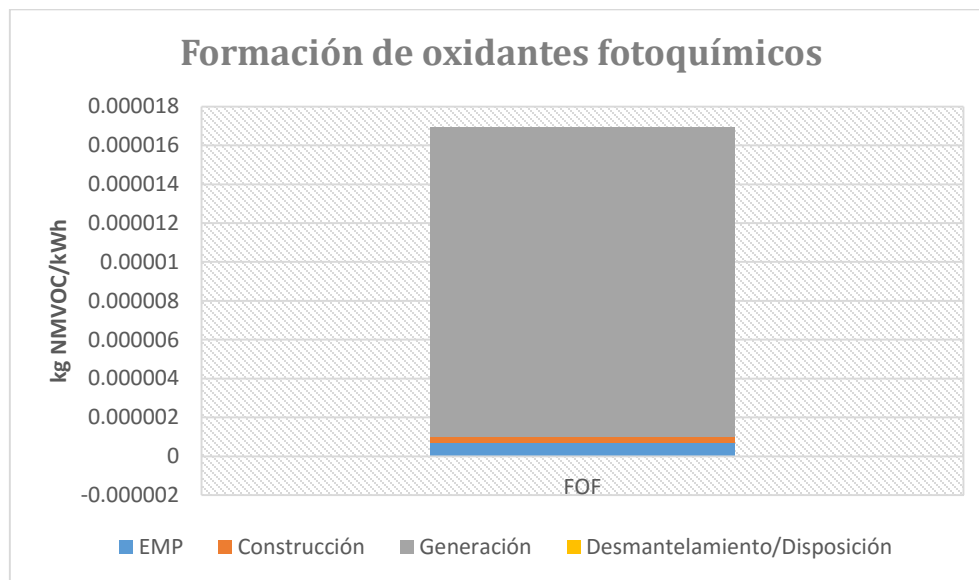


Figura 28. Contribuciones a la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos por etapa del sistema bio.

## 4.2.8 Agotamiento de Agua

### 4.2.8.1 Energía undimotriz

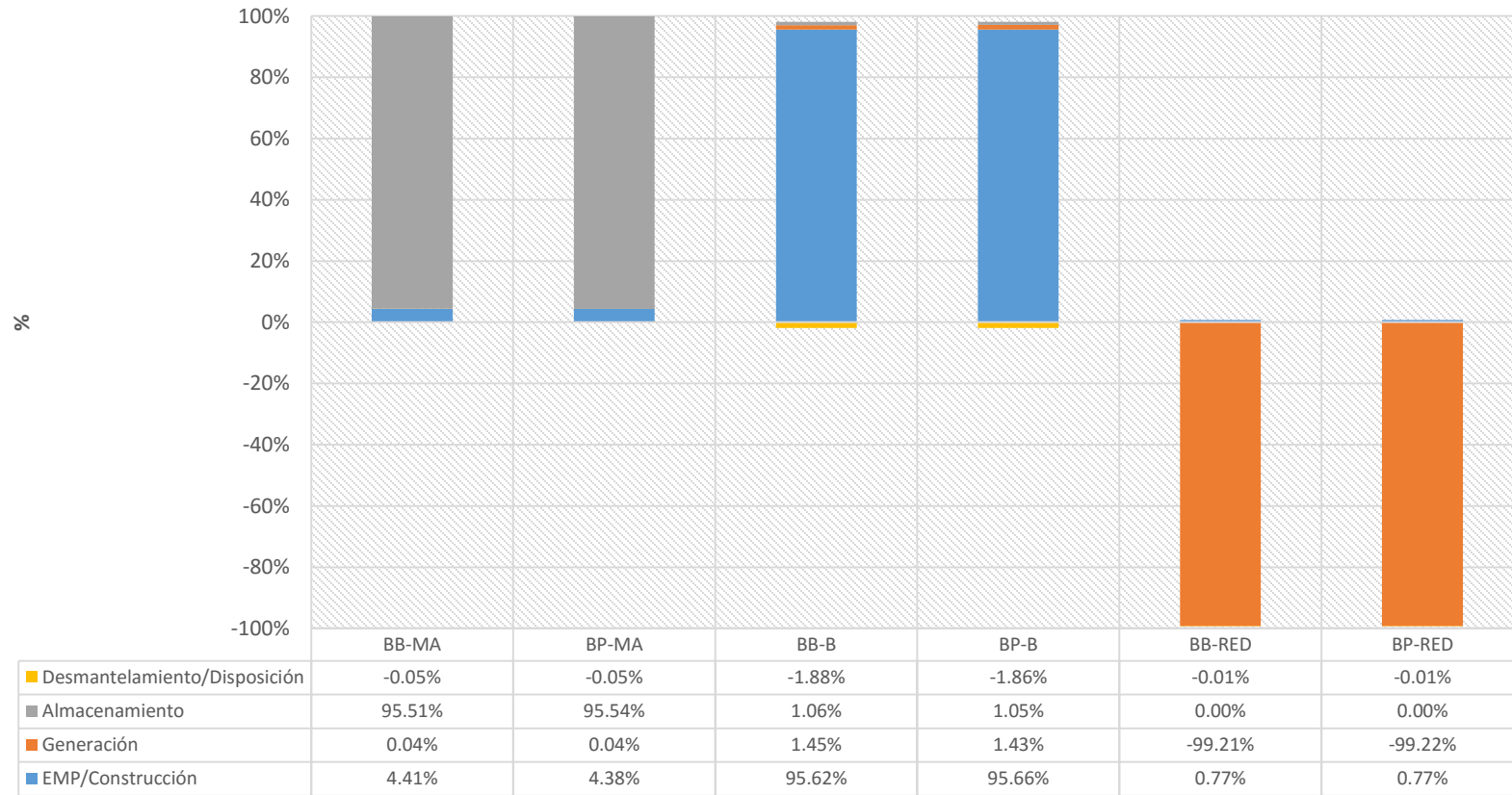
En esta categoría destaca la etapa de almacenamiento para los escenarios “BB-MA” y “BP-MA”, se presenta un alto impacto potencial de agotamiento de agua, a causa del agua utilizada durante esta etapa. El impacto global de ambos escenarios es  $5.2086E-04m^3/kWh$  y  $5.2087E-04m^3/kWh$  respectivamente, ambos escenarios tienen mayor porcentaje de contribución en la etapa de almacenamiento, sin embargo la etapa de construcción también hace diferencia puesto que el uso de boya con brazo articulado presenta una mayor contribución, esto atribuible a la cimentación que se requiere para la estructura lo que implica un mayor requerimiento de este recurso.

Tabla 30. Contribuciones a la categoría de Agotamiento de Agua, valores totales por escenario de energía undimotriz.

Agotamiento de Agua (AA) [ $m^3/kWh$ ]					
Escenario Undimotriz	EMP/ Construcción	Generación	Almacenamiento	Desmantelamiento	Impacto total
BB-MA	2.4028E-05	1.9692E-07	5.2086E-04	-2.5554E-07	5.45E-04
BP-MA	2.3882E-05	1.9692E-07	5.2087E-04	-2.5554E-07	5.69E-04
BB-B	1.3029E-05	1.9692E-07	1.4486E-07	-2.5554E-07	1.58E-04
BP-B	1.3173E-05	1.9692E-07	1.4469E-07	-2.5554E-07	1.33E-05
BB-RED	1.3487E-05	-1.7278E-03	-	-2.5554E-07	-1.71E-03
BP-RED	1.3345E-05	-1.7278E-03	-	-2.5554E-07	-1.61E-03

Mientras que los escenarios con batería presentan un menor potencial de impacto en agotamiento de agua, siendo la etapa de EM/construcción la que contribuye con un mayor porcentaje, esto se debe a la fabricación de las baterías, mostrando de igual modo que el uso de boya en brazo incrementa el potencial de esta categoría para los seis escenarios analizados.

## Agotamiento de Agua



**Figura 29. Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario para la categoría de Agotamiento de Agua.**



#### 4.2.8.2 Energía de biomasa

Durante la etapa de generación se puede observar en la figura 30 que prácticamente todas las contribuciones para esta categoría de impacto, registrando un  $8.864E-04 \text{ m}^3/\text{kWh}$ , originado esto por los altos requerimientos durante el proceso de acondicionamiento de la materia y la digestión anaerobia.

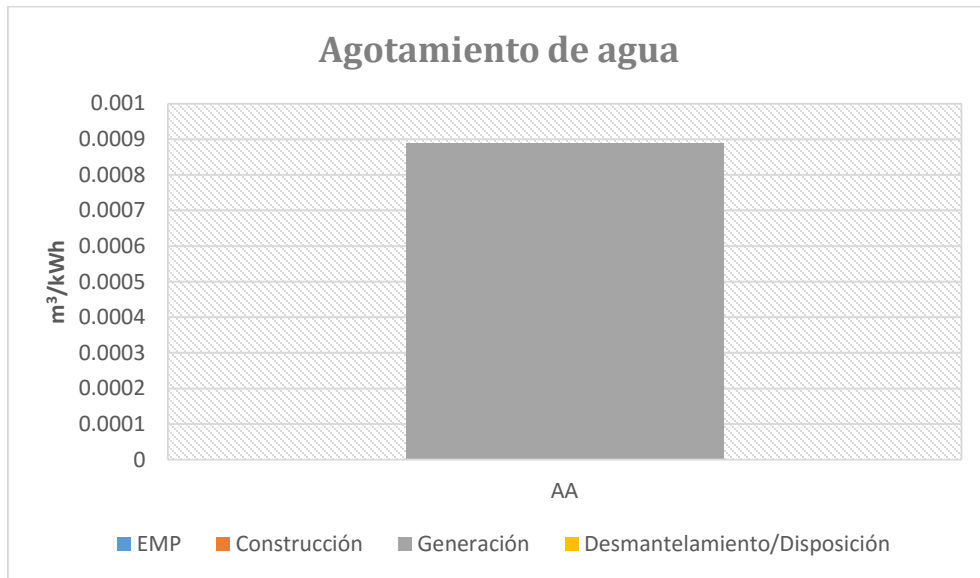


Figura 30. Contribuciones a la categoría de Agotamiento de Agua pro etapa del sistema bio.

## 4.2.9 Agotamiento de Recursos Minerales

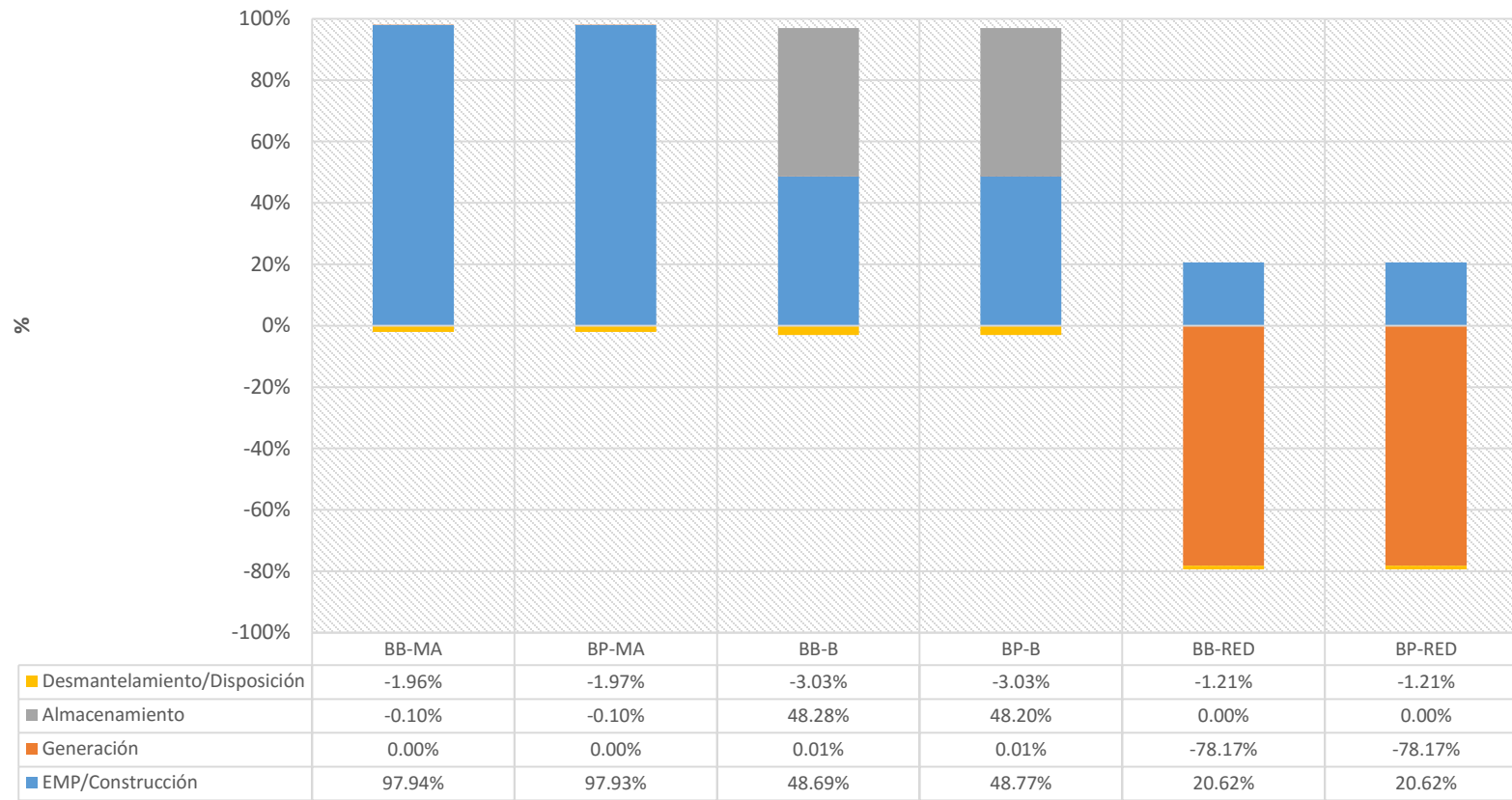
### 4.2.9.1 Energía undimotriz

En la tabla 31 se puede observar que los escenarios con mini-almacén (“BB-MA” y “BP-MA”) presentan menos impactos comparados con los de batería, siendo la etapa de EMP/construcción la que presenta un mayor porcentaje de contribución en ambos casos, esto se atribuye al uso de combustibles fósiles tanto para la construcción de la estructura de la boya, como en la fabricación de las baterías el uso de minerales es alto.

Tabla 31. Contribuciones a la categoría de Agotamiento de recursos minerales, valores totales por escenario de energía undimotriz.

Agotamiento de Recursos Minerales (AM) [kg FE eq/kWh]					
Escenario Undimotriz	EMP/ Construcción	Generación	Almacenamiento	Desmantelamiento	Impacto total
BB-MA	4.161E-03	1.621E-07	-4.069E-06	-8.342E-05	4.07E-03
BP-MA	4.155E-03	1.621E-07	-4.071E-06	-8.342E-05	8.31E-03
BB-B	1.342E-03	1.621E-07	1.331E-03	-8.342E-05	2.59E-03
BP-B	1.345E-03	1.621E-07	1.329E-03	-8.342E-05	1.26E-03
BB-RED	1.418E-03	-5.374E-03	-	-8.342E-05	-4.04E-03
BP-RED	1.418E-03	-5.374E-03	-	-8.342E-05	-4.02E-03

## Agotamiento de Recursos Minerales



**Figura 31. Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario para la categoría de Agotamiento de Recursos Minerales**

Por otro lado el uso de mini-almacén durante la etapa de almacenamiento presenta un alto porcentaje de impactos evitados, esto a que durante esta etapa el uso de algún tipo de mineral es nulo, presentado en los escenarios “BB-MA” y “BP-MA” porcentajes de impactos evitados del 0.10%.

#### 4.2.9.2 Energía de biomasa

Durante la etapa de EMP se obtuvo un impacto de  $7.16282E-05$  kg Fe eq/kWh la categoría de agotamiento de recursos minerales atribuyendo estos resultados a los materiales necesarios para la construcción de la planta como el acero y los equipos industriales, así como a los combustibles que requieren uso de grandes cantidades de metales durante su infraestructura. Por otro lado la etapa de generación contribuye registra  $1.17E-04$ kg Fe eq lo cual se atribuye al uso de energía necesaria para el proceso. Los resultados obtenidos en el presente estudio presenta valores similares a los obtenidos por Bacenetti et al. (2016), ya que oscila entre 0.49 y 1.20 g Fe eq./kWh, en donde atribuye dichos impactos a la producción y el transporte de materias primas, y con un menor porcentaje, pero no menos importante las infraestructuras de los sistemas analizados en dicho estudio.

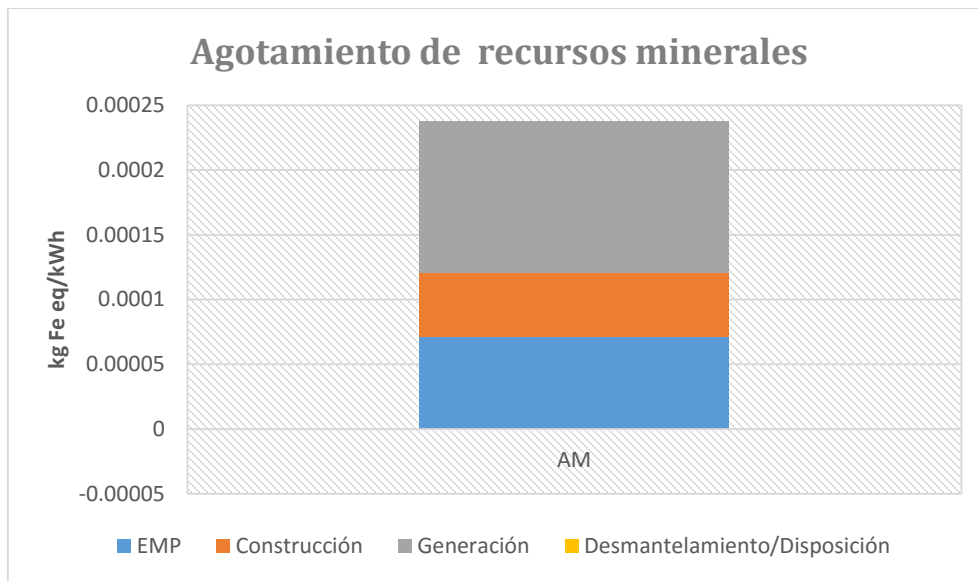


Figura 32. . Contribuciones a la categoría de Agotamiento de Recurso Minerales por etapa del sistema bio,

#### 4.2.10 Agotamiento de Combustibles Fósiles

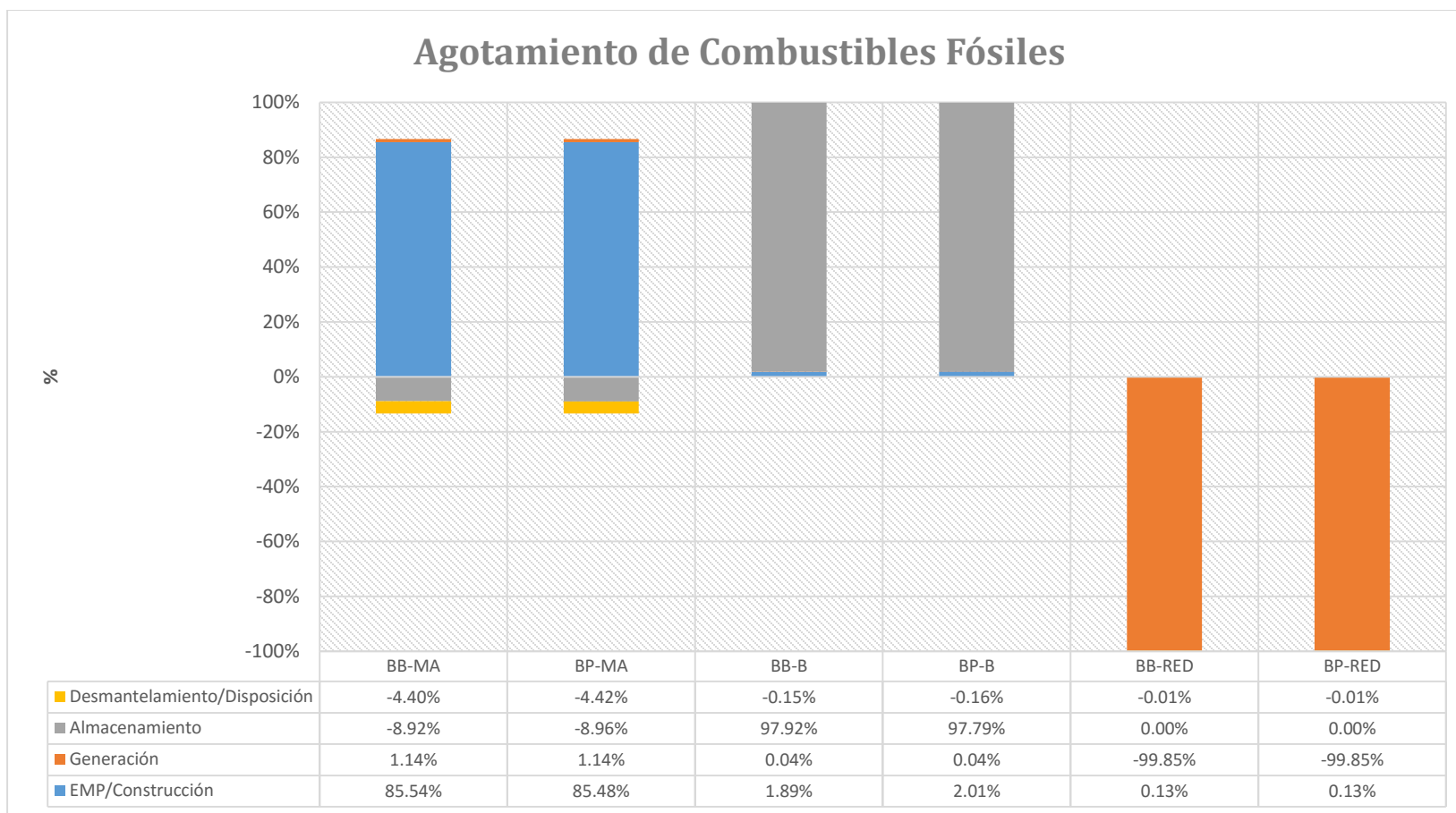
Para esta categoría de impactos los valores globales de los escenarios analizados (ver tabla 32) nos muestran que los escenarios BB-MA, BP-MA, BB-RED y BP-RED presentan impactos evitados, debido a que con su tecnología se evita la generación de energía eléctrica mediante combustibles fósiles, mientras que para los escenarios BB-B Y BP-B arrojan una alta cantidad de impactos generados, como se ha descrito en las categorías analizadas anteriormente, esto se debe al uso de la batería como medio de almacenamiento, puesto que durante la etapa de construcción de la batería se requiere un alto uso de energía eléctrica, lo cual se traduce en consumo de combustibles fósiles. Por otro lado, la energía de biomasa presenta impactos para esta categoría, sin embargo son significativamente menores a los generados por la energía producida convencionalmente.

##### 4.2.10.1 Energía undimotriz

En esta categoría de impacto evidentemente y como se ha visto el uso de baterías refleja un alto consumo energético y de insumos por lo que los escenarios “BB-B” y “BP-B” son los que presentan un mayor impacto, con un mayor porcentaje de contribución en la etapa de almacenamiento causado por el número de baterías que serán requeridas durante el periodo de tiempo de 10 años. De igual forma estos escenarios durante la etapa de construcción presentan altos impactos, estos se deben a dos factores la fabricación de las baterías por el alto consumo energético y la construcción de la estructura para las boyas, destacando que la boya articulada a brazo contribuye con un menor porcentaje en el impacto global de dicho escenario (“BB-B”) debido a un mayor consumo de combustibles fósiles tanto en maquinaria, como en el transporte de insumos ya que este es mayor respecto al escenario “BP-B”.

Tabla 32. Contribuciones a la categoría de Agotamiento de combustibles fósiles, valores totales por escenario de energía undimotriz.

Agotamiento de Combustibles Fósiles [kg Oil eq/kWh]					
Escenario Undimotriz	EMP/ Construcción	Generación	Almacenamiento	Desmantelamiento	Impacto total
BB-MA	4.8986E-04	6.5228E-06	-5.1100E-05	-2.5200E-05	4.20E-04
BP-MA	4.8771E-04	6.5228E-06	-5.1122E-05	-2.5200E-05	9.35E-04
BB-B	3.2305E-04	6.5228E-06	1.6710E-02	-2.5200E-05	1.70E-02
BP-B	3.2312E-04	6.5228E-06	1.5692E-02	-2.5200E-05	3.21E-04
BB-RED	2.7294E-04	-2.0390E-01	-	-2.5200E-05	-2.04E-02
BP-RED	2.7294E-04	-2.0390E-01	-	-2.5200E-05	-2.04E-02



**Figura 33. Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario para la categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles**

#### 4.2.10.2 Energía de biomasa

La categoría de agotamiento de combustibles fósiles es encabezada por la etapa de generación, con un potencial de impacto de  $1.47E-03 \text{ kg oil eq/kWh}$ , atribuyendo dichos impactos principalmente al consumo de energía eléctrica debida a los equipos necesarios de este proceso. La etapa de EMP registra  $2.08E-04 \text{ kg oil eq/kWh}$  de los impactos generados atribuyendo estos al traslado de la materia prima del lugar de origen al lugar de transformación.

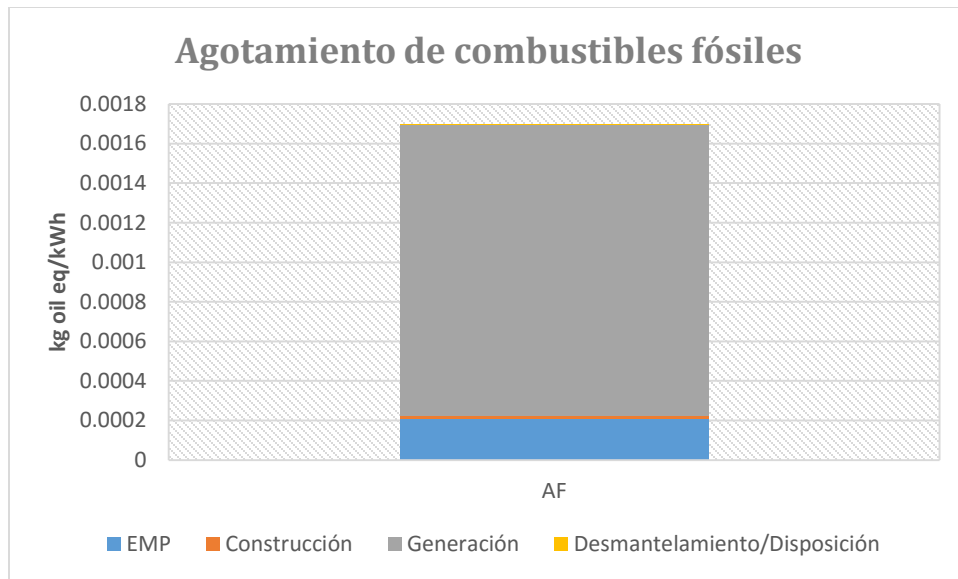


Figura 34. Contribuciones a la categoría de Agotamiento de Combustibles Fósiles por etapa del sistema bio.

#### 4.2.11 Análisis de sensibilidad

La comparación de diferentes métodos de asignación es sin duda de importancia crucial, ya que los resultados de ACV dependen de la elección de los métodos de asignación (Luo L. et al., 2009).

El presente análisis de sensibilidad se realiza para comparar dos métodos de asignación para el ACV de energía bio, considerando dos tipos de repartición, económica y másica. La evaluación de ciclo de vida discutida en el capítulo anterior se realizó a partir de una repartición másica, es decir, considerando la cantidad de masa de agave corresponde a la materia orgánica empleada para la generación de biogás, que en ese caso corresponde al 32%. Por lo cual, al realizar el inventario en la etapa de EMP de los impactos cuantificados se consideran únicamente el 32% generados por el uso de la materia orgánica destinada a la generación de biogás.

##### 4.2.11.1 Impacto global caracterizado considerando un reparto másico

En la figura 30 representa el impacto ambiental global por cada categoría analizada, con lo que se puede observar de manera general y como previamente se ha venido discutiendo, la etapa con mayores contribuciones ambientales es la de generación, ya que en 8 de las 9 categorías analizadas tiene los mayores porcentajes de contribución, atribuyendo estos impactos primero el uso de agua durante la transformación de la materia orgánica en biogás y las emisiones generadas también durante esta etapa. El uso de energía eléctrica por parte de los equipos durante el proceso de generación es una de las principales actividades causantes de los altos impactos en las categorías analizadas.

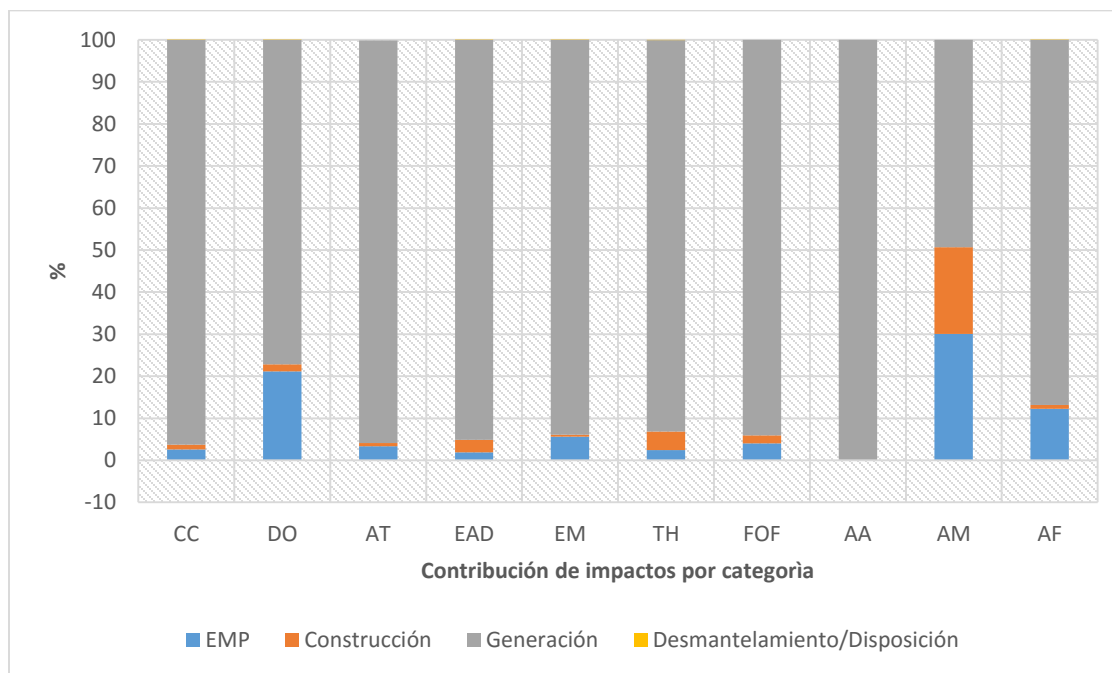


Figura 35. Impacto ambientales caracterizados del sistema bio considerando un reparto másico



#### 4.2.11.2 Análisis de sensibilidad considerando repartición económica.

Al realizar el ACV considerando un reparto económico de impactos, se parte de que los residuos de la industria tequilera carecen de valor económico, es decir, que durante la etapa de obtención de la materia prima durante el proceso de siembra y cosecha no se toman en cuenta impactos por la materia orgánica que genera el biogás, puesto que no tiene un valor monetario.

Los resultados del ACV considerando reparto económico muestran influir de manera considerable en los resultados.

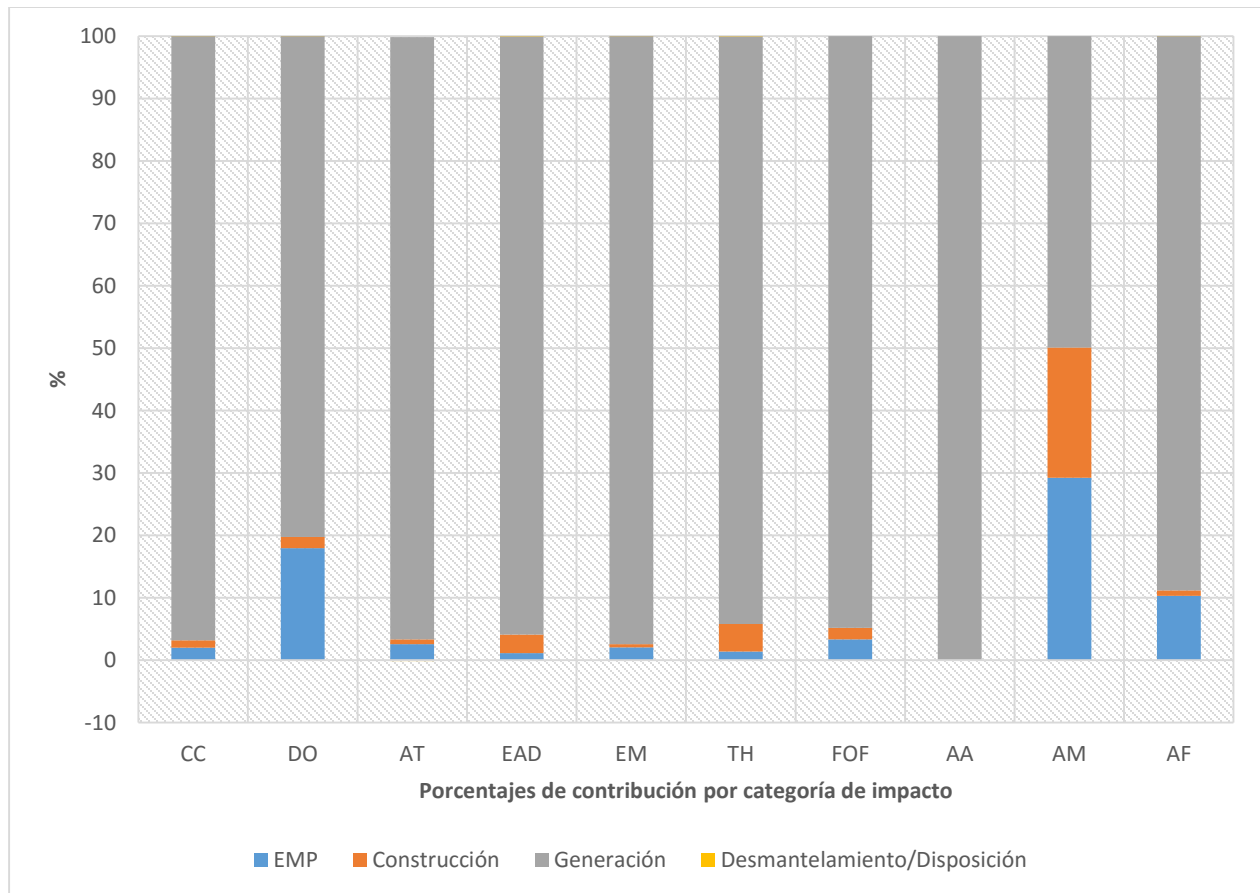


Figura 36. Impacto ambientales caracterizados del sistema bio considerando un reparto económico.

Cómo se puede observar en la figura 36 cuando se considera un reparto económico de los impactos ambientales, se tiene que durante la etapa de EMP los impactos son menores comparados al considerar un reparto másico y esto para todas las categorías de impacto analizadas.

Se puede identificar lo siguiente:

- Al tomar en cuenta el reparto económico los impactos generados durante la etapa de EMP disminuyen para 8 de las 9 categorías analizadas.
- La categoría de Agotamiento de agua no se ve afectada, puesto que el mayor uso de agua es durante la etapa de generación.

- Las categorías se ven afectadas por el reparto económico principalmente por actividades en la siembra, por el uso de fertilizantes, pesticidas, herbicidas y maquinaria durante el cultivo generando emisiones de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO y NH<sub>3</sub> los cuales contribuyen a la generación de oxidantes fotoquímicos con el ozono estratosférico, no obstante el uso de hidrocarburos durante la parte de distribución de materia prima forma parte de las contribuciones de impacto en las categorías analizadas.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Los resultados de Análisis de Ciclo de Vida permiten identificar para cada tecnología de generación de energía, los principales contribuyentes a las categorías de impacto.

Destacando para la energía undimotriz durante la etapa de almacenamiento se pueden generar grandes impactos dependiendo de la tecnología que se emplee, es decir, el uso de baterías es el escenario con las mayores contribuciones ambientales, mientras que el uso de un mini-almacén, disminuye notoriamente los impactos, sin dejar de lado que el mejor escenario es que la energía generada sea directamente enviada a la red eléctrica para su uso. Por otro lado, hablando de la etapa de construcción destaca el uso de prototipo 2 (Boya en plataforma), puesto que el menor uso de cantidad de material para su construcción se refleja en una menor contribución de impactos, sobre todo en categorías como agotamiento de recursos minerales, cambio climático y disminución de la capa de ozono, esto atribuido de igual forma a los procesos de obtención de materiales como el cemento, así como el uso de combustibles fósiles.

Por lo que es el mejor escenario para esta tecnología es BP-Red, es decir, usar la boya en plataforma con envío de la energía eléctrica generada a la red, sin embargo, si el proyecto requiere el almacenamiento de esta energía generada, es recomendable el uso del mini-almacén, puesto que este escenario presenta en 8 categorías de las 9 analizadas menores contribuciones, presentando impactos evitados por uso de estas tecnologías.

En cuanto a la energía de biogás se pudo detectar que la etapa con mayor contribución ambiental es la generación, con porcentajes altos de contribución en cada una de las categorías analizadas, esto principalmente por la energía eléctrica que se requiere para el arranque del proceso, es decir, los equipos que son necesarios para el desarrollo de la tecnología. Con lo que este ACV mostró que la elección de la tecnología para generar el biogás es un paso importante a definir al momento de pensar en generar energía eléctrica por este medio, ya que de esto dependen los equipos que serán necesarios para la instalación de una planta generadora de energía eléctrica mediante biogás.

Otro de los puntos importantes para generar energía eléctrica utilizando biomasa, es definir la materia orgánica que será empleada, en este caso de estudio se analizó el uso de residuos orgánicos obtenidos de la industria tequilera, sin embargo, el punto importante es la localización de la planta y el lugar de obtención de la materia prima (materia orgánica), ya que se logró detectar que el transporte de los residuos influyen de manera importante en los impactos ambientales, destacando la categoría de formación de foto oxidantes químicos, por el uso de combustibles fósiles.

Comparando las tecnologías analizadas, en 8 de las 9 categorías la energía de biomasa y la energía undimotriz (en los escenarios de mini almacén y red) presentan menores impactos que los generados por la tecnología convencional, la categoría de Agotamiento de agua es la categoría en la cual las tecnologías de energía renovable presenta mayores impactos respecto a la convencional, lo cual abre un área de oportunidad para mejorar a las tecnologías energía renovables en este aspecto.

Respecto a considerar un reparto económico para el ACV de energía bio, es importante destacar que si se toma en cuenta un reparto económico los impactos ambientales en la etapa de EMP se ven disminuidos de manera significativa, por lo que considerar la forma de hacer el reparto de suma importancia ya que afecta directamente al análisis.

Por lo que se puede concluir que el uso de energías renovables para generación de energía eléctrica comparado con la forma convencional de generar energía es una buena opción por la disminución de impactos que representa, a excepción del sistema undimotriz con uso de batería de iones de litio.

## **5.2 Recomendaciones**

Es recomendable que para los sistemas analizados de energías renovables se realice un análisis de la forma de conectar la energía eléctrica generada a la red eléctrica, para de esta manera incluir en el ACV

Para el sistema Bio se recomienda ajustar el sistema, de tal forma que se pueda conocer la energía eléctrica neta entregada para su uso, implementar estrategias de logística que permitan una mejor obtención de la materia prima, con el fin de disminuir los impactos ambientales generados por este medio, así como la definición de la tecnología implementada para la transformación de los residuos en energía, ya que de esto depende el equipo industrial y la energía requerida para realizar el proceso.

Se recomienda que para próximos estudios se considere el sistema de entrega a red eléctrica, ya que puede presentar grandes aportaciones considerando que estas tecnologías tengan una introducción pronta en nuestro país y sería importante contar con este análisis.

Es importante considerar los sistemas a nivel laboratorio, ya que este tipo de energías en nuestro país aún se encuentran en desarrollo el escalamiento a nivel macro nos da una mayor incertidumbre en los resultados.

## 6 REFERENCIAS

- Agenbur, Agencia Provincial de la Energía de Burgos. (2016). *Energía de la Biomasa*. [En línea] Disponible en: <http://www.agenbur.com/es/contenido/index.asp?iddoc=410> [Consultado 5 Jun. 2016].
- Bermejo R. (2014). *Del desarrollo sostenible según Brundtland a la sostenibilidad como biomimesis. Hegoa*. Universidad del País Vasco. España.
- Bilgili M., Ozbek A., Sahin B., and Kahranman A. (2015). An overview of renewable electric power capacity and progress in new technologies in the world. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 49, 323-334.
- Bonher SA de CV. (2014). Equipo Undimotriz. Carpeta Informativa Técnica. Energy Forever SA de CV.
- Cámara de diputados. (2014). *Energías Renovables. Estudio del Marco Jurídico Actual, de Políticas Públicas, Derecho Comparado a nivel Estatal e Internacional, de los Dictámenes aprobados en las Leyes Secundarias en Materia Energética y Opiniones Especializadas*. Dirección General de Servicios de Documentación, Información y Análisis. Ciudad de México.
- Centro Mario Molina. (2013). Análisis de ciclo de vida de casos de estudios de futuras centrales eléctricas en México.
- Chang Y, Chu P. and Tseng R. (2015). Site selection of ocean current power generation from drifter measurements. *Renewable Energy*. 80, 737-745.
- Chen S., B. Cen y D. Song. (2012). Life-cycle energy production and emissions mitigation by comprehensive biogas-digestate utilization. *Biorsource Technology*, 357-364.
- Collet P., A. Hélias, L. Lardon, M. Ras, R. Goy and J. Steyer. (2011). Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. *Biorsource Technology*, 207-214.
- Coxtinica A. (2015). *La generación de energía eléctrica por fuentes renovables y su uso en México*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Eléctrico y Electrónico. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- Dina (2015). Modelos del sistema de generación de energía. Universidad Nacional Autónoma de México. No publicado.
- Estrada C. y Arancibia A. (2010). Las energías renovables: La energía solar y sus aplicaciones. *Revista Digital Universitaria*. Vol. 11. No. 8.

- Falcón B. and Sanchez O. (2015). *Energías renovables: biogás, Hidrógeno y Metanol*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Nezahualcóyotl, Edo. De México.
- Fernández R. (2011). *La dimensión económica del desarrollo sostenible*. Editorial Club Universitario. San Vicente, España.
- García A. (2012). *Política para garantizar la Seguridad Energética en México con base en el Desarrollo de las Energías Renovables*. Tesis para obtener el título de Licenciado en Ciencias Políticas y Administración Pública. Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. De México.
- Garzón C. (2010). *Evaluación de alternativas de generación de electricidad desde el punto de vista de su impacto ambiental, para sectores no conectados a redes eléctricas*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Eléctrico. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Centro de Investigación y Pruebas Electroenergéticas. Ciudad de la Habana, Cuba.
- Girard (2009). *Fuentes de energías convencionales y alternas*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico. Universidad Nacional Autónoma de México. Cuautitlán Izcalli, Edo de México.
- Goedkoop M. and Spriensma R. (2000). Eco-indicator 99 damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. PRé, Product ecology consultants.
- Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., Struijs J. van Zelm R., and De Schtyver A. (2013). *ReCiPe 2008 Alife cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*. Ruimte en Milieu Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordenin en Milieubeheer: First edition (versión 1.08)
- González A. (2012). *Energía*. [Web log post]. Recuperado de: <http://www.edu.xunta.es/centros/iesfelixmuriel/system/files/La%20Energ%C3%ADa.pdf>
- Güereca, L. P. y Juárez, R. (2013). *El Análisis del Ciclo de Vida del Almacenamiento de Energía en Baterías. Análisis del Ciclo de Vida del almacenamiento de energía en embalses, Análisis comparativo*. Proyecto-Reporte Final. Instituto Ingeniería de la UNAM-AXIS ingeniería.
- 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.
- Guía (2001). "Guía Metodológica Estudio de Ciclo de Vida". Gobierno de Chile, Comisión Nacional del Medio Ambiente. Proyecto minimización de Residuos provenientes de Embalajes (De romero, 2003)

- Guinée J., Gorreér M. Heijungs R., Huppés G., de Koning A., Wegener A. and Huijbregts M. (2002). Handbook on life cycle assessment. *Operational guide to the ISO Standards*.
- Hadian S. and Madani K. (2015). A system of systems approach to energy sustainability assessment: Are all renewable really green? *Ecological Indicators* 52, 194-206.
- Hahn H., K. Hartmann, L. Bühle and M. Wachendorf. (2014). Comparative life cycle assessment of biogas plant configurations for demand oriented biogas supply for flexible power generation. *Bioresource Technology*, 348-358.
- Hernández F. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida como herramienta de decisión para el tratamiento de agua residual en América Latina y El Caribe*. Tesis para optar el grado de Doctor en Ingeniería. Ciudad de México, México.
- Hernández N. y I. Rivas. (2009). *Tendencias de generación por ciclos combinados*. Tesis para optar el título de Ingeniero. Instituto Politécnico Nacional. México, D. F.
- IEA Statistics. (2015). *Renewables Information*. International Energy Agency. París, France.
- International Agency Energy Agency. (2015). Energy and Climate Change. World Energy Outlook Special Report. Paris, France.
- IPCC, informe del Grupo de Trabajo I- Base de las Ciencias Físicas. Glosario A-D, [en línea], IPCC, [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/es/annexsanexo-1-1.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/annexsanexo-1-1.html). Consultado el 28 de marzo de 2017.
- ISO. (2006). ISO 14044 Environmental Management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines. International Organization for Standardization.
- Jiménez U. (2013). *Análisis de Ciclo de Vida de las botellas de PET que se recolectan como residuo en el Municipio de Ecatepec de Morelos*. Tesis para optar el grado de Maestro en Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México. D.F., México.
- Jin Y., T. Chen, X. Chen and Z. Yu. (2014). Life-cycle assessment of energy consumption and environmental impact of an integrated food waste-based biogas plant. *Applied Energy*. 227-236.
- Kelly K., McMacnus M. and Hammond G.(2012). An energy and carbón life cycle assessment of tidal power case study: The proposed Cardiff-Weston Severn barrage scheme. *Energy*. 44, 692-701.
- Ley General de Cambio Climático (2015, 02 abril). [En línea]. México: Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Disponible en: [http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6583/1/ley\\_general\\_de\\_cambio\\_climatico.pdf](http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6583/1/ley_general_de_cambio_climatico.pdf) [2016, 5 de junio]

- Li S., Gao L. and Jin H. (2016). Life cycle energy use and GHG emission assessment of coal-based SNG and power cogeneration technology in China. *Energy Conversion and Management*. 112, 91-100.
- Luján C. (2015). *Análisis de ciclo de vida de billetes mexicanos de polímero y papel de algodón de alta durabilidad*. Tesis para optar por el grado de maestro en ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. D.F. México.
- Martínez J (2015). *Análisis híbrido de Ciclo de Vida de una planta geotérmica; del inventario másico al monetario*. 46° congreso de Investigación y Desarrollo. Tecnológico de Monterrey.
- Martínez O. y Taddei J. (2015). *El Análisis de Ciclo de Vida a la generación de energía eléctrica para una turbina de gas en planta de ciclo combinado en el estado de Sonora México*. Universidad De Sonora, Hermosillo, Son. México.
- Mayorga J. (2014). *Evaluación conceptual del potencial de aplicación de energías renovables en México*. Tesis para obtener el título de Ingeniera Química. Universidad nacional Autónoma de México.
- Messeguer J. (2014). *Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el ciclo de Vida de un Calentador Solar Doméstico*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Industrial. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- Morales F. (2015). *Análisis del Ciclo de vida, de la producción de biodiesel a partir de aceites usados*. Tesis para optar el grado de Maestro en ciencias biológicas. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- Morh R. (2007). *Inserción de generadores de energía renovable en redes de distribución*. Tesis para optar el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia universidad Católica de Chile. Santiago de Chile.
- Muphy F., Sosa A., McDonnell K and Devlin G. (2016). Life cycle assessment of biomass-to-energy systems in Ireland modelled with biomass supply chain optimization based on greenhouse gas emission reduction. *Energy*. 108, 1040-1055.
- Nava I. (2014). *Balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas separadas del medio acuoso*. Tesis para optar el grado de Maestro en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. D.F., México.
- Nogués F. y Royo J. (2002). *Ciclo energías renovables. Jornadas de biomasa*. Fundación CICER. Zaragoza, España.



- Ortiz Y. (2015). *Análisis de ciclo de Vida de la generación eléctrica. Aplicación para una central eólica y una central solar fotovoltaica*. Tesis para obtenerle título de Ingeniero eléctrico. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.
- Padilla A. (2015). *Metodología para evaluar el desempeño de la infraestructura hídrica en el contexto de la sustentabilidad urbana*. Tesis para optar el grado de Doctor en Urbanismo. Universidad Nacional Autónoma de México. D.F. México.
- Pehnt M. (2006). Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy* 31, 55-71.
- Piere F., Bekkering J, Benders R., and Moll H.c. (2016). A new approach for measuring the environmental sustainability of renewable energy production systems: Focused on the modelling of green gas production pathways. *Applied energy*, 162, 131-138.
- Poeschl M., S. Ward and P. Owende. (2011). Environmental impacts of biogas deployment-Part II: life cycle assessment of multiple production and utilization pathways. *Journal of Cleaner Production*, 184-201.
- Ramírez R. (2014). *Análisis de Ciclo de Vida aplicado a Plantas termoeléctricas convencionales y de ciclo combinado*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico. Universidad Nacional Autónoma de México. D.F., México.
- Rehl T. and J. Müller. (2011). Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies. *Resources, conservation and Recycling*, 92-104.
- REN 21. (2015). *Renewables 2015. Global Status Report*. REN 21 Steering Committee. París, France.
- Reyes Y. (2015). *Un método para evaluar proyectos de electrificación rural en México con aprovechamiento de energías renovables*. Tesis para optar por el grado de Maestra en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. D.F., México.
- Rodríguez B., Fernández M. and Fernández N. (2014) *Life cycle Assessment of Distributed Energy Generación on Cienfuegos*. Revista: Scielo, Energética. 35,119-127. La Habana.
- Ruíz R. (2010). Energías alternativas. *Ciencia*. Vol. 61. No. 2. México.
- Sabugal S. y Gómez F. (2006) *Centrales térmicas de ciclo combinado*. Diaz de Santos, España.
- Santoyo-Castelazo E., H. Gujba and A. Azapagic. (2011). Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy*. 36, 1488-1449.
- Santoyo-Castelazo E. and A. Azapagic. (2014). Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*. 80, 119-138.

- Santoyo-Castelazo E., L. Stamford and A. Azapagic. (2014). Environmental implications of decarbonising electricity supply in large economies: The case of Mexico. *Energy Conversion and Management*. 85, 272-291.
- Secretaría de Energía. (2008). *Energías renovables: energía biomasa*. Tecnología de la Información, Dirección General de Cooperación y Asistencia Financiera, Secretaría de Energía. Argentina.
- SENER (2013). *Estrategia Nacional de Transición Energética y Aprovechamiento Sustentable de la Energía*. Secretaría de Energía. México.
- SENER. (2013). Estrategia Nacional de Energía 2013-2027. [En línea]. México D.F.: Secretaría de Energía. Disponible en: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=37957550>
- SENER. (2014). Estrategia Nacional de Energía 2014-2028. [En línea]. México D.F.: Secretaría de Energía. Disponible en: <http://www.globelegislators.org/globe-mexico.org/images/PDF/ENE%202014.pdf>
- SENER. (2015). *3er Informe de Labores 2014-2015*. Ciudad de México. Secretaria de Energía.
- SENER. (2015). Prospectiva del Sector Eléctrico 2015-2019. [En línea]. México D.F.: Secretaría de Energía. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva\\_del\\_Sector\\_Electrico.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva_del_Sector_Electrico.pdf)
- Sokka L., Sinkko T., Holma A., Manninen K., Pasanen K., Rantala M and Leskinen P. (2016). Environmental impacts of the national renewable energy targets-A case study from Finland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59, 1599-1610.
- Tang H., Kraatz S., Chen G., Aboobaker and Jiang C. (2014). Hig-resolution survey of tidal energy towars power generation and influence of sea-level-rise: A case study at coast of New Jersey, USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 32, 960-982.
- Tonini D. And T. Astrup (2012). LCA of biomass-based energy systems: A case estudy for Denmark. *Applied Energy*. 99, 234-246.
- Uihlein A. and 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.
- Universidad de La Punta. *Gobierno de San Luis. Tipos de Centrales*. Educación Tecnológica. [En línea]. [Consultado: 20 de Octubre 2016]. Disponible: <http://contenidosdigitales.ulp.edu.ar/exe/educaciontecnologia/index.html>
- Van Dijk A., Van Wijen H., Chaplin G., and Slape H., (2007). "Skin-colour: the natural sunscreen against skin cancer", In preparation.

- Van Zelm R., Van Jaarseveld H., Reinds G., Huijbregts M., Struijs J., and van de Meent D., (2007). Time horizon dependent characterization factors for acidification in life-cycle assessment based on forest plant species occurrence in Europa. *Environmental Science & Technology*, 41, 922-927.
- Vargas A. (2015). *Análisis de la sustentabilidad de la eoloelectricidad en México considerando su ciclo de vida*. Tesis para optar el grado de Doctora en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- Varun, Bhat I. and Praskash R. (2009). LCA of renewable energy for electricity generation systems- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13, 1067-1073.
- *World Energy Outlook*. (2014). Agencia Internacional de Energía. París, Francia.
- Zabihian F. and Fung A. (2011). Review of marine renewable energies. Case study of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15. 2461-2464.
- Zhang X. and Wang F. (2016). Hybrid input-output analysis for life-cycle energy consumption and carbon emissions of China's building sector. *Building and Environment*. 104, 188-197.

# ANEXO A

## Energías Renovables

- **Energía hidráulica**

Se basa en el aprovechamiento de la energía potencial y/o cinética del agua de los ríos. El agua es llevada a una turbina, donde mueve los álabes y genera un movimiento de rotación de su eje; dicho eje está unido al alternador, el cual genera la energía eléctrica.

Se pueden distinguir tres tipos:

- ✓ Centrales hidroeléctricas de reserva. Este tipo de centrales necesitan la construcción de un embalse. Esta tecnología almacena agua en un embalse de gran capacidad y producen electricidad en función de las expectativas sobre el valor futuro de dicha agua embalsada y las precipitaciones futuras.
- ✓ Centrales hidroeléctricas de agua fluyente. Las cuales no disponen de grandes embalses, dependiendo su producción básicamente del aporte de agua recibido en cada momento. Las centrales hidroeléctricas de agua fluyente no cuentan con reserva de agua y, por lo tanto, turbinan el agua de la que disponen en cada momento. Son centrales con gran caudal pero poco salto. La construcción se realiza sobre el propio cauce del río (González, 2012).
- ✓ Centrales de bombeo o reversibles. Estas centrales disponen de dos embalses situados a diferente nivel, consiguen la energía a base de bombear agua entre dichos embalses (consumiendo electricidad para ello), para posteriormente producir electricidad turbinando el agua previamente elevada. Cuando la demanda de energía eléctrica alcanza su máximo nivel a lo largo del día, el agua almacenada en el embalse superior, hace girar el rodete de la turbina asociada a un alternador funcionando como una central convencional. Generalmente, bombean cuando el precio de la electricidad es bajo y generan (turbinando el agua previamente bombeada) cuando el precio de la electricidad es elevado, obteniendo así un margen y contribuyendo a estabilizar los precios del mercado. Se pueden clasificar en dos tipos: las de bombeo puro, en las que el embalse superior es un gran depósito cuya única aportación de agua es la que se bombea del embalse inferior, y las de bombeo mixto, en las que el embalse superior tiene también aportaciones naturales (Álvarez A., 2012)

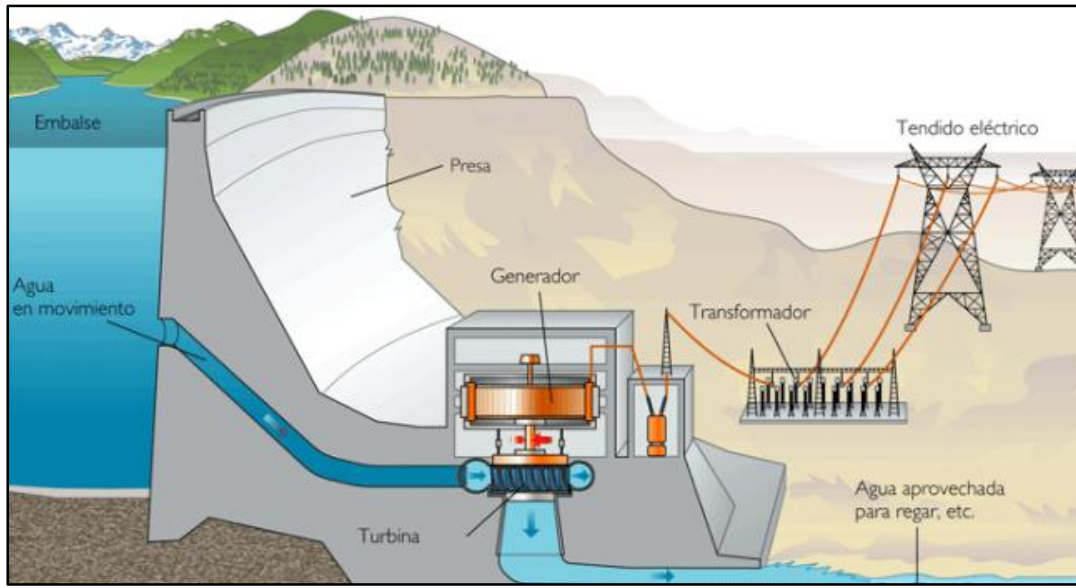


Figura 37. Esquema de una planta hidroeléctrica (González, 2012)

Las ventajas y desventajas de las centrales hidroeléctricas se muestran en la tabla 33:

Tabla 33. Ventajas y desventajas de una central hidroeléctrica.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una energía renovable, implica que no se agota</li> <li>• Su uso directo no implica emisión de contaminantes a la atmósfera</li> <li>• El agua utilizada para golpear los álabes de las turbinas hidráulicas es completamente limpia por lo que se puede reutilizar para regadío o cualquier otra actividad.</li> <li>• Las centrales hidroeléctricas ayudan a controlar y regular el caudal de los ríos.</li> <li>• Mejoramiento en las labores agrícolas (riego)</li> <li>• Las centrales hidroeléctricas tienen una larga vida útil.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El agua embalsada no tiene las condiciones de salinidad, gases disueltos, temperatura, nutrientes, emisiones de metano.</li> <li>• Impide el normal desarrollo de peces y otras especies acuáticas que tienen que remontar los ríos para desovar y se encuentran con murallas que no pueden traspasar.</li> <li>• Construcción de grandes presas en zonas pobladas y sísmicas puede poner en riesgo las vidas humanas, la flora y la fauna existente.</li> <li>• Disminución del caudal de ríos y arroyos.</li> </ul>

- **Energía eólica**

La energía eólica corresponde a la energía que es obtenida del viento, mediante el aprovechamiento de su energía cinética, que es provocada por las corrientes de aire: esta energía, como la mayoría de las renovables depende en cierta forma de la energía solar. El sol provoca diferentes temperaturas en cada zona del planeta por lo tanto se obtiene diferentes presiones atmosféricas y esto hace que las masas de aire de alta presión se desplacen a zonas de baja presión originándose el viento. Una de las características principales de la energía eólica, es que debido a su recurso primario el viento, ya que presenta gran variabilidad a lo largo del día y en las diferentes zonas geográficas (Morh, 2007)

La tecnología empleada para generar energía eléctrica a partir de la energía eólica es el aerogenerador, este generador está constituido básicamente de un rotor (que incluye las hélices o aspas las cuales se encuentran conectadas al eje principal o rotor), una góndola (es en donde se sitúa el generador eléctrico, sistemas de control, orientación y freno) y la torre (que por lo general es tubular, y es la que soporta a la góndola y al rotor) (Ver figura 38) (Garzón, 2010).

El rotor, por medio de una serie de engranajes, se acopla a un generador eléctrico; aprovechando la energía cinética del viento que al chocar con las hélices, se produce un movimiento en ellas obteniendo la energía mecánica, que es transformada mediante un generador de energía eléctrica.

Las características fundamentales de un aerogenerador son las siguientes:

- Esta energía crea dependencia directa de las condiciones climatológicas que cada zona posea para obtener la cantidad de potencia requerida.
- Se instalan generalmente en zonas costeras, alturas montañosas, islas o en mar abierto.
- Un número de palas inadecuado puede incidir en un menor rendimiento (la estela que deja una la puede recoger la siguiente y frenarse); sin embargo, a mayor número de palas menor par de arranque; por tal razón se ha considerado la opción de tres palas como la óptima.

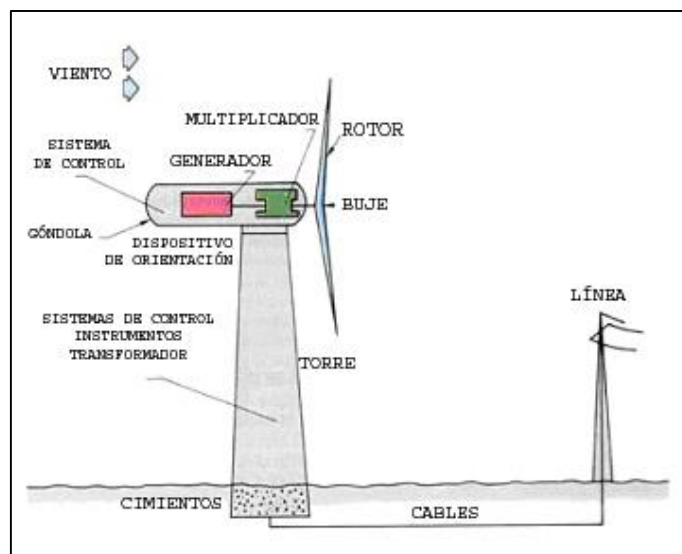


Figura 38. Partes que contribuyen a un aerogenerador (Cecu.es, 2016)

El uso de esta tecnología empleada para el aprovechamiento de energía eólica tienes ventajas y desventajas que se muestran en la tabla 34:

**Tabla 34. Ventajas y desventajas de los usos de energía eólica.**

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evita el uso de combustibles fósiles, lo que implica una reducción en las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.</li> <li>• No genera ruido exagerado y es relativamente barata pudiendo competir con energías tradicionales.</li> <li>• Reduce el tráfico terrestre o marítimo cerca de las centrales y no es necesario la instalación de tuberías para el transporte de combustible, gas y otros.</li> <li>• Estas energías pueden instalarse en sectores rurales creando fuentes de trabajo y ayudando al crecimiento e igualdad de servicios de cada población, ya que no es indispensable la conexión a una red de un sistema eléctrico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesitan amplios espacios para su operación, con grandes máquinas generadoras lo que perjudica el cultivo de las tierras para poder operar en este sector.</li> <li>• Los parques eólicos causan un impacto estético, y alteran el paisaje en las zonas aledañas.</li> <li>• Aunque el costo de los parques eólicos es estable, la inversión inicial es alta.</li> <li>• Los parques eólicos causan daños a las aves que colisionan con los aerogeneradores.</li> <li>• Cuando se instalan en zonas terrestres pueden provocar trastornos psicológicos a la población</li> </ul>

- **Energía solar**

El Sol es una de las fuentes de energía más constantes, a causa de la abundancia y la alta irradiación que genera en la capa exterior de la atmósfera. La energía recibida en la superficie de la tierra recibe el nombre de irradiancia, la cual depende de tres factores principalmente: la hora del día, la inclinación de los rayos de sol y la cobertura de las nubes.

La energía que ofrece el sol en forma de luz y calor hoy en día puede ser transformada gracias a los avances tecnológicos, reduciendo el consumo de energía eléctrica y calorífica proveniente de fuentes convencionales. El uso de energía solar se justifica no sólo por el ahorro en el consumo de energéticos convencionales sino porque contribuye al bien común, mejorando la calidad del aire, la rentabilidad macroeconómica y colaborando en la generación de empleos y riqueza a través de diversas oportunidades de negocio (solar).

La tecnología que se emplea para la generación de energía eléctrica a partir de la energía solar son las celdas fotovoltaicas y los concentradores solares con una capacidad de generación a nivel mundial para el año 2012 de 100GW y 2.5 GW, respectivamente.

Las celdas fotovoltaicas transforman directamente la luz del Sol en energía eléctrica, los concentradores solares aprovechan la radiación del sol para elevar a altas temperaturas un fluido que posteriormente produce la energía mecánica para mover un generador eléctrico y así generar energía eléctrica.

Las centrales solares son instalaciones destinadas a aprovechar la radiación del Sol para generar energía eléctrica. Existen 2 tipos de instalaciones con las que se puede aprovechar la energía del Sol para producir electricidad:

- En la central termosolar se consigue la generación eléctrica a partir del calentamiento de un fluido con el cual, mediante un ciclo termodinámico convencional, se consigue mover un alternador gracias al vapor generado de él.
- En la instalación fotovoltaica la obtención de energía eléctrica se produce a través de paneles que captan la energía luminosa del Sol para transformarla en energía eléctrica. Para conseguir la transformación se emplean células fotovoltaicas fabricadas con materiales semiconductores.

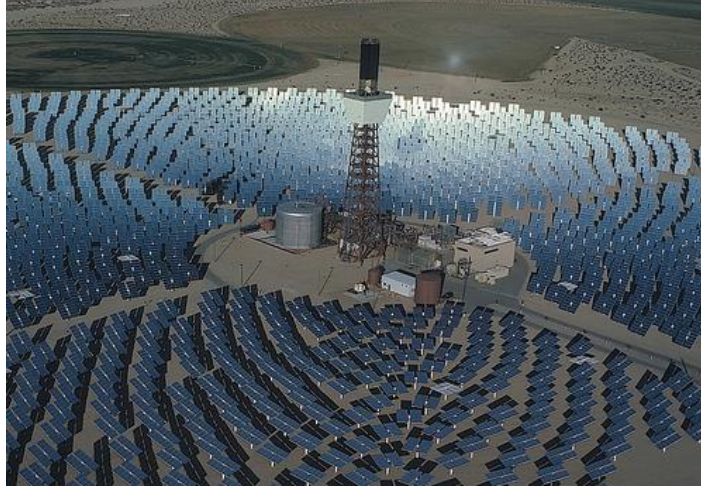


Figura 39. Centra solar (Endesa Educa, 2016)

En la tabla 35 se muestran las ventajas y desventajas del uso de energía solar como fuente de generación de energía.

Tabla 35. Ventajas y desventajas de la energía solar.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una energía relativamente limpia e inagotable.</li> <li>• Las instalaciones solares no requieren un gran mantenimiento, los costes en mantenimiento son mínimos.</li> <li>• En la etapa de generación de electricidad no emana gases contaminantes que perjudiquen la atmósfera.</li> <li>• La energía solar es un excelente recurso para los lugares de difícil acceso o muy lejanos de las redes eléctricas instaladas. Para su instalación a pequeña escala no requiere grandes inversiones en líneas de transmisión.</li> <li>• El uso de la radiación solar es gratuito.</li> <li>• Su aprovechamiento como fuente de energía puede ser directo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un panel solar consume una gran cantidad de energía para ser fabricado. La energía para la fabricación de un panel solar puede ser mayor que la potencia generada por él a lo largo de su vida útil.</li> <li>• Los precios son muy altos en comparación con otras fuentes de energía.</li> <li>• Son muy vulnerables ante la acción de vientos huracanados, así se demostró en BCS al paso de Odile (2015).</li> <li>• Se requiere una fuente energética alternativa o el uso de baterías para los días que las condiciones atmosféricas no sean buenas o por la noche.</li> <li>• Al momento de terminar su ciclo de vida puede causar impacto sobre el medio ambiente por causa de desechos fotovoltaicos.</li> <li>• Se requiere de grandes espacios de terreno para su uso a gran escala que dejan de ser útiles para otros usos.</li> </ul>



## ANEXO B

- **CATEGORÍAS DE IMPACTO A NIVEL PUNTO MEDIO**

Estas categorías evalúan la magnitud del impacto generado de manera directa a un mecanismo ambiental, sin tomar en cuenta las repercusiones que éstas puedan ocasionar a la salud humana o al ecosistema.

Para la caracterización de impactos a nivel punto medio se define la siguiente expresión:

$$I_m = \sum_i Q_{mi} m_i \quad (1)$$

Donde

$m_i$  = Es la magnitud de la intervención  $i$

$Q_{mi}$  = Es el factor de caracterización que conecta la intervención  $i$  con la categoría de impacto de punto medio  $m$

$I_m$  = Es el indicador resultante para la categoría de impacto de punto medio

- **CATEGORÍAS DE IMPACTO A NIVEL DE PUNTO FINAL**

Las categorías de impacto a nivel punto final, tienen un enfoque orientado a los daños que se generan a los componentes finales del mecanismo ambiental, se traduce en impactos ambientales en temas de interés como la salud humana, el medio ambiente natural y los recursos naturales.

Existen dos procedimientos de caracterización de los impactos a nivel de punto final, el primero se realiza sin la intervención de los cálculos de punto medio y la formula es:

$$I_e = \sum_i Q_{ei} m_i \quad (2)$$

En donde:

$m_i$  = es la magnitud de la intervención  $i$

$Q_{ei}$  = es el factor de caracterización que conecta la intervención  $i$  con la categoría de impacto de punto final  $e$

$I_e$  = es el indicador resultante para la categoría de punto final  $e$

El segundo procedimiento para caracterización de los impactos a nivel de punto final es partiendo del cálculo de puntos intermedios:

$$I_e = \sum_m Q_{em} I_m \quad (3)$$

En donde:

$I_m$  = es el resultado del indicador de punto medio en la categoría de impacto  $m$

$Q_{em}$  = es el factor de caracterización que conecta la categoría de impacto  $m$  a nivel punto medio con la categoría de impacto  $e$  a nivel punto final.

$I_e$  = es el indicador resultante para la categoría de impacto de punto final  $e$ .

Las categorías de impacto a nivel punto final son pocas, se analizan tres áreas de protección: daños a la salud humana, ecosistemas y recursos.

**Tabla 36. Categorías de impacto a nivel punto final.**

CATEGORÍA DE IMPACTO	INDICADOR	UNIDAD	FORMA DE EVALUACIÓN
<b>Daño a la salud humana</b>	DALY (disability-adjusted loss of life)	Años	$DALY = YLL + YLD$ $YLD = w * D$ En donde: YLL: Años perdidos YLD: Años de incapacidad D: Duración de la enfermedad w: Es un factor de gravedad que toma valores de 0 a 1 (0 se asigna a un estado de salud completa y 1 a cosas de defunción)
<b>Daño a la diversidad de los ecosistemas</b>	Perdida de especies durante un año	Años	$CF_{ED} = PDF_{terr} * SD_{terr} + PDF_{fw} * SD_{fw} + PDF_{mw} * SD_{mw}$ En donde: CF <sub>ED</sub> : Factor de caracterización por daño al ecosistema PDP <sub>terr</sub> : (Fracción de desaparición de especies terrestres) factor de caracterización en PPF.m <sup>2</sup> .año SD <sub>terr</sub> : Factor de densidad de especies terrestres (especies/m <sup>2</sup> ) PDF <sub>fw</sub> : (Fracción de desaparición de especies de agua dulce) factor de caracterización en PDF.m <sup>3</sup> .año SD <sub>fw</sub> : Factor de densidad de especies de agua dulce (especies/m <sup>3</sup> ) PDF <sub>mw</sub> : (Fracción de desaparición de especies marina) factor de caracterización en PDF.m <sup>3</sup> .año SD <sub>mw</sub> : Factor de densidad de especies marina (especies/m <sup>3</sup> )
<b>Daño a la disponibilidad de recursos</b>	Mayor costo	\$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aumento de costo marginal</li> </ul> $MCL_r = \frac{\Delta Cost_r}{\Delta y_{ierldr}}$ Es el factor que representa el aumento del costo de una mercancía $r$ (US\$/kg), debido a una extracción (kg) del recurso $r$ . Se expresa en dólares por kilogramo cuadrado durante el año 2000 (US\$/kg <sup>2</sup> ). Por lo tanto, el aumento de los costos, expresado en dólares por kilogramo (\$/kg), se debe multiplicar por un factor que expresa la cantidad consumida. Este paso convierte la extracción de un recurso en un aumento de costos para a la sociedad en general. El valor actual para la sociedad por extracción de recursos se calcula sumando el aumento del costo marginal para cada $t$ años en el futuro, multiplicado por el importe de consumo anual ( $P_{r,t}$ en kg/año) dividido entre el aumento de los costos por la tasa de descuento. La práctica internacional recomienda tasas de descuento que varían entre 1 y 15% (Luján, 2015)

- **MODELOS DE CARACTERIZACIÓN CON MÉTODO RECIPE**

ReCiPe recurre a diferentes modelos de caracterización para las diferentes categorías de impacto, a continuación se presentará la manera en que el método evalúa las categorías de impacto consideradas en el presente estudio.

- ✓ **Cambio climático**

Cambio climático es definido por el IPCC como un cambio en el estado del clima que puede ser identificado por variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persisten por un largo periodo de tiempo, típicamente décadas o periodos de tiempo más largos. El cambio climático puede ser causa de procesos internos naturales, a forzamientos externos o cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmosfera o del uso de la tierra, es decir, ya sea a la variabilidad natural o como resultado de la actividad humana (IPCC, 2007).

Los mecanismos ambientales utilizados para esta categoría de impacto se estructuran por 4 pasos:

Paso 1: Forzamiento radiativo: se define como el cambio de la irradiación neta vertical (expresada en  $Wm^2$ ) en la tropopausa o en la parte superior de la atmosfera, debida a una variación del causante externo del cambio climático; por ejemplo, una variación de concentración de dióxido de carbono o de la radiación solar (IPCC, 2013). El forzamiento radiativo se utiliza para cuantificar la variación del balance energético de la Tierra que se produce como consecuencia de un cambio de origen externo (Gómez, 2016).

ReCiPe a diferencia de otros modelos de daño es el desarrollo del modelo de daño para puntos finales para  $CO_2$  únicamente. Las otras sustancias de la categoría se tienen en cuenta utilizando los factores equivalentes del IPCC. Estos factores de equivalencia toman en cuenta el forzamiento radiativo de las sustancias y el tiempo de residencia (Goedkoop, et al, 2013). El impacto se expresa como el Potencial de Calentamiento Global o Global Warming Potential (GWP).

Estos factores de equivalencia de  $CO_2$  se calculan utilizando la siguiente expresión:

$$GWP_{x,T} = \frac{\int_0^T a_x x[x(t)]dt}{\int_0^T a_r x[r(t)]dt} \quad (4)$$

Donde:

$GWP_{x,T}$ : representa el potencial de calentamiento global de una sustancia x.

T: es el tiempo considerado para realizar el cálculo.

$a_x$ : es la eficiencia de radiación debida a un aumento de una unidad de la sustancia en la atmósfera ( $Wm^{-2}kg^{-1}$ )

$x(t)$ : es la abundancia de la sustancia x dependiente del tiempo.

El GWP de diferentes gases de efecto invernadero puede ser comparado para determinar cuál causará el mayor forzamiento radiativo en un determinado periodo de tiempo. El forzamiento radiativo es obtenido de modelos de transferencia de infrarrojo basados en mediciones en laboratorio que tienen en cuenta propiedades y peso moleculares de las sustancias.

La tabla 37 Presenta los principales compuestos que contribuyen al calentamiento global, con el tiempo de permanencia en el ambiente, su eficacia radiativa y su efecto con respecto al CO<sub>2</sub> según IPCC.

**Tabla 37. Potenciales de Calentamiento Global relacionados con el CO<sub>2</sub>.**

NOMBRE	FORMULA QUÍMICA	TIEMPO DE VIDA (AÑOS)	EFICACIA RADIATIVA	POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL 100 AÑOS
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	Ver abajo <sup>a</sup>	<sup>b</sup> 1.4E-05	1
Metano	CH <sub>4</sub>	12 <sup>c</sup>	3.70E-04	1
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	114	3.03E-03	310
<i>Principales sustancias controladas por el Protocolo de Montreal</i>				
CFC-11	CCl <sub>3</sub> F	45	0.25	3800
Halon-1301	CrBrF <sub>3</sub>	65	0.30	5400
Tetracloruro de carbón	CCl <sub>4</sub>	26	0.13	1400
Bromuro de metilo	CH <sub>3</sub> Br	0.7	0.01	5
HCFC-22	CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	5	0.06	146
HFC-23	CHF <sub>3</sub>	270	0.19	11700
<i>Hidrocarburos y otros compuestos –Efectos directos</i>				
Dimetilo de éter	CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>	0.015	0.02	1
Cloruro de metileno	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	0.38	0.3	31
Cloruro de metilo	CH <sub>3</sub> Cl	1	0.01	45

Fuente: Adaptada de (IPCC, 2007)

<sup>a</sup>La función de la respuesta del CO<sub>2</sub> utilizada en esta tabla se basa en la versión revisada del modelo del ciclo de carbono de Bern utilizando una concentración de CO<sub>2</sub> con un valor de 378ppm. El deterioro de un pulso de CO<sub>2</sub> con el tiempo está dado por:

$$a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i * e^{-t/\tau_i}$$

Donde  $a_0=0.217$ ,  $a_1 = 0.259$ ,  $a_2=0.338$ ,  $a_3 = 0.186$ ,  $t_1=172.9$  años.  $t_2=18.51$  años, y  $t_3=1.186$  años, para  $t < 1$  años.

<sup>b</sup>La eficiencia radiativa del CO<sub>2</sub> se calcula utilizando la expresión simplificada del (IPCC, 1990), con un valor de concentración actualizado de 378 ppm y una perturbación de + 1 ppm.

<sup>c</sup>El tiempo de perturbación del CH<sub>4</sub> es de 12 años. PCM del CH<sub>4</sub> incluye efectos indirectos de mejoras de ozono y vapor de agua en la estratósfera.

Paso 2. Temperatura: el factor temperatura también es considerado debido al efecto que tiene sobre el tiempo de residencia del CO<sub>2</sub>, así como daños a la salud y a los ecosistemas.

La relación entre la emisión de CO<sub>2</sub> y el efecto la temperatura se puede expresar de la siguiente manera:

$$TF = LT_{CO_2} * \frac{\Delta TEMP_t}{\sum_t E_{CO_2}} \quad (5)$$

Donde

TF: es el factor de temperatura para 1 kg de CO<sub>2</sub> (en °C\*año\*kg<sup>-1</sup>).

LT<sub>CO<sub>2</sub></sub>: la línea de tiempo de CO<sub>2</sub> (año)

ΔTEMP<sub>t</sub>: el cambio en promedio de la temperatura entre la situación presente y la situación en el tiempo t (°C)

E: es la masa anual de CO<sub>2</sub> (kg/yr)

La segunda parte del factor temperatura es el cambio de temperatura causado por una emisión durante cierto tiempo. El impacto de la mitigación de acuerdo a Meinshausen (2005) está definido como la emisión de carbón evitada en un periodo de tiempo t sobre la temperatura, se puede calcular de la siguiente manera:

$$\Delta TEMP_t = c * \sum_t E_{CO_2} \quad (6)$$

Donde

C: representa la sensibilidad de la mitigación (°C/kg)

E: la cantidad másica de carbón mitigado sumado sobre el periodo durante la cual la emisión tiene lugar.

Como resultado, la relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y el cambio de temperatura depende de la sensibilidad de mitigación de CO<sub>2</sub>. La segunda parte del factor de temperatura puede ser obtenido como:

$$\frac{\Delta TEMP_t}{\sum_t E} = \frac{c * \sum_t E_{CO_2}}{\sum_t E_{CO_2}} = c \quad (7)$$

Por lo tanto, el factor temperatura se puede determinar de la siguiente manera:

$$TF = 7.09 \times 10^{-6} * 150 = 1.064 \times 10^{-13} C. año. kg^{-1} \quad (8)$$

Finalmente la frecuencia e intensidad de los efectos dependen de la región y el tiempo (Schryver et al, 2009).

Paso 3. Daños a la salud: el cambio climático tiene diferentes efectos a la salud humana. Los efectos pueden ser directos o indirectos. Entre los directos encontramos olas de calor y contaminación del aire, mientras que en los efectos indirectos se presentan enfermedades infecciosas y malnutrición.

El factor de daño a la salud por efectos del cambio climático se determina mediante la relación de cambios en la temperatura y la variación en el DALY. Este factor se determina como:

$$DF_{HH} = \frac{\Delta IMPACT}{\Delta TEMP} = \frac{\Delta Att. B_{tot}}{\Delta T} \quad (9)$$

Donde

$DF_{HH}$ : es el daño a la salud humana (daly/año°C)

$\Delta T$ : es la diferencia marginal en el aumento de temperatura entre el escenario de referencia (1990) y el escenario de emisiones escogido para el año 2030.

$\Delta Att. B_{tot}$ : el incremento de la propensión de una población a contraer una enfermedad, según el escenario elegido para el 2030.

La propensión atribuible se puede definir como:

$$Att. B_{tot} = (RR_{r,h} - 1) * BoD_{r,h} \quad (10)$$

Donde

$\Delta Att. B_{tot}$ : representa la carga atribuible en la región  $r$  y para el efecto a la salud  $h$  durante un año.

$RR$ : es el riesgo para el escenario de emisión escogido.

$BoD$ : es la carga de enfermedad, para cada región  $r$  y para el efecto a la salud  $h$  durante un año.

El  $BoD$  puede ser descrito como el número de DALYs perdidos a la enfermedad para el factor de riesgo de interés, durante el periodo de referencia 1990.

La propensión atribuible a una región  $r$  por daños a la salud  $h$ , durante un año, el riesgo relativo  $RR$  para un escenario  $BoD$  se puede determinar de la siguiente manera:

$$Att. B_{tot} = \sum Att. B_{r,h} \quad (11)$$

Donde

$Att. B_{tot}$ : es la carga atribuible global en daños a la salud debido a una elevación de temperatura.

Los factores de riesgo relativo ( $RR$ ) dependen del escenario de emisiones y de temperatura elegidos. Los factores  $RR$  se encuentran publicados en el informe “Cambio climático y salud humana” M. Michael et al., (2013). El método ReCiPe considera seis regiones diferentes en el mundo y cinco efectos a la salud; dado que el cambio climático es de impacto global se consideran los riesgos para cada región en específico. Los DALY'S para el periodo de referencia de 1990 se derivan del reporte de Murray, J.L et al., (1996).

Paso 4. Daños en los ecosistemas: Existen diversos factores que vinculan el cambio climático con la pérdida de especies principalmente el aumento de la temperatura y el impacto en las condiciones meteorológicas.

El factor de daño a los ecosistemas debido al cambio climático se deriva de la relación que existe entre el aumento de la temperatura y los cambios de la desaparición de una fracción de especies. Este factor se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$DF_{ES} = \frac{\Delta IMPACT}{\Delta TEMP} * SD_{terr} = \frac{\Delta Damage_{eco}}{\Delta T} * SD_{terr} = \frac{\Delta PDF * AREA * SD_{terr}}{\Delta T} \quad (12)$$

En donde,

$DF_{ES}$ : es el factor de daño [ $1/^\circ\text{C}$ ].

$\Delta PDF$ : es el cambio en el potencial de la disminución en la fracción de especies.

$AREA$ : el área total del planeta, excluyendo las áreas donde no hay especies.

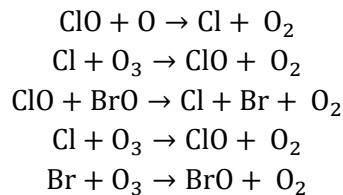
$SD_{terr}$ : es la densidad de especies.

### ✓ Disminución de la capa de ozono

La capa de ozono es un cinturón de gas de ozono natural que se sitúa entre 15 y 30 kilómetros sobre la Tierra, protegiendo a la misma de la dañina radiación ultravioleta (radiación UV-B) emitida por el Sol. El ozono se forma y destruye de manera continua por acción de la luz solar y reacciones químicas en la estratósfera, por lo tanto si esta radiación no es absorbida por la capa de ozono esta llega a la superficie terrestre, ocasionando daños a los seres vivos.

La reducción de la capa de ozono ocurre si la tasa de destrucción de ozono se incrementa debido a las pérdidas fugitivas de sustancias antropogénicas que persisten en la atmósfera (Fahey, 2002).

El factor de caracterización de la disminución de la capa de ozono explica la destrucción de ozono en la estratósfera a causa de las emisiones de origen antropológico. Estos productos son químicos recalcitrantes que contienen átomos de cloro y bromo los cuales tienen un periodo largo de vida, por lo tanto un periodo largo de permanencia en la atmosfera y reaccionan con la misma formando los clorofluorocarbono (CFC), liberando Cl y BR que son capaces de degradar la capa de ozono. A continuación se muestran las reacciones que generan la degradación de la capa de ozono.



El potencial de disminución de ozono (ODP) se ha definido como una medida relativa de la capacidad de agotamiento del ozono y utiliza CFC-11 como referencia. El método ReCiPe 2008, se enfoca a los daños a la salud humana debido a que la incertidumbre es alta con respecto a otras áreas de protección. Para la caracterización de los daños, se toman en cuenta factores de protección, como el color de la piel y los hábitos culturales, como la ropa (Van Dijk, 2007; Gómez, 2016))

Para determinar la exposición de los rayos UV se tienen en cuenta variables como la altitud de la población expuesta, así como también características demográficas, tendencias, densidad de población, el promedio de edad, entre otras. El modelo de caracterización se incluye un factor de caracterización que toma en cuenta un factor de protección universal para todos los tipos de cáncer en la piel. Lo anterior resulta en una relación para el factor de protección como función del tipo de piel.

$$f_{prot} = 10^{-0.0321(\text{skinRefl}-66)} \quad (13)$$

Donde

*skinRefl*: es la reflectancia de la piel en porcentaje 0.66

El factor de equivalencia obtenido en este modelo corresponde al Potencial de Agotamiento de Ozono (ODP), el cual es una medida relativa para determinar el potencial que una sustancia presenta para destruir la capa de ozono, comprende el tiempo de residencia atmosférica y el agotamiento de ozono estratosférico y se puede calcular mediante la siguiente expresión.

$$\Delta OD_j = \sum_{i \in j} \Delta m_i * ODP_i(\infty) \quad (14)$$

Donde

$\Delta m_i$ : la cantidad evitada de odsi (ozone depletion substances) del grupo j desde 2003 en adelante.

$\Delta OD_j$ : es el factor de equivalencia de ods i (kg cfc-11 eq por kg de odsi)

El modelo de caracterización determina la relación entre el daño a la salud y al desviación de los rayos UV, en el caso de las cataratas la relación es más certera que en el caso del cáncer de piel. Para realizar una evaluación del daño a la salud requiere una relación dosis-respuesta (Van Zelm, et al., 2007)

#### ✓ Toxicidad humana

La toxicidad es la capacidad inherente de una sustancia química de producir efectos adversos en los organismos vivos. La toxicidad depende de factores como la concentración, las condiciones del receptor, tiempo y medio de exposición, además de la metodología empleada para realizar la traducción de datos empíricos de laboratorio a efectos ambientales potenciales (Luján, 2015).

El factor de caracterización de toxicidad humana y la ecotoxicidad está asociada con el tiempo de persistencia (destino), la acumulación en la cadena alimenticia humana (exposición) y la toxicidad (efecto) de una sustancia química. El destino y los factores de exposición se pueden determinar por medio de un modelo de evaluación, mientras los efectos pueden ser derivados de los datos de toxicidad obtenidos de forma experimental en seres humanos y animales (Hertwich et al., 2000).

La variación en estado estacionario de la concentración en un entorno ambiental debido a la emisión se define como el factor de persistencia (destino) específica para el entorno y se determina de la siguiente manera Huijbregts et al., 2005):

$$F_{j,i,x} = \frac{\partial C_{j,x}}{\partial M_{i,x}} \quad (15)$$

Donde

$F_{j,i,x}$  : representa la fracción de consumo de población humana en una escala geográfica (g), incluyendo el transporte de una sustancia x a través de la ruta de consumo r (kg.día<sup>-1</sup>) en una escala g.

Se utiliza el 1,4 diclorobenceno como sustancia de referencia en los cálculos referentes a toxicidad humana, agua dulce, ecotoxicidad marina e industrial y ecotoxicidad terrestre.



A nivel de punto final, el daño causado a la población humana por una serie de enfermedades expresado en  $DALY_{OV}$  puede ser determinado de la siguiente manera:

$$DALY_{OV} = N_{POP} * \sum_e DALY_e * R_e \quad (16)$$

Donde

$DALY_{OV}$ : es una medida de daño general a la población humana

$N_{POP}$ : se refiere a la población expuesta

$DALY_e$ : es el DALY por enfermedad de tipo  $e$

$R_e$ : es la probabilidad de ocurrencia de enfermedad tipo  $e$  en la población

$DALY_e$  es la suma de los años de vida perdidos (YLL<sub>e</sub>) y los años de incapacidad de ocurrencia de enfermedad tipo  $e$ . El método incluye 49 tipos de enfermedades.

El factor de caracterización humana para una sustancia  $x$  emitida se relaciona con el factor de destino y daño:

$$CF_{r,i,x,g,c/nc} = F_{r,i,x,g} * E_{r,x,c/nc} \quad (17)$$

Donde

$CF_{r,i,x,g,c/nc}$ : es el factor de caracterización humano para efectos cancerígenos y no cancerígenos en una escala  $g$  que representa el transporte de una sustancia  $x$  a través de una ruta  $r$ , ya sea ingestión o inhalación, de las emisiones anuales  $i$  (año.kg<sup>-1</sup>).

#### ✓ Acidificación terrestre

La acidificación terrestre es generada por la deposición de sustancias inorgánicas como los nitritos, sulfatos y fosfatos, provocando daños en el suelo, en las aguas superficiales, aguas subterráneas, organismos vivos y en las edificaciones. Existen muchas emisiones ácidas generadas por el ser humano y otras a partir de reacciones atmosféricas. Ejemplo de ello es el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) que reacciona con agua en la atmósfera para formar "lluvia ácida" y el óxido de nitrógeno que se transforma en ácido nítrico. El potencial de acidificación terrestre se expresa en dióxido de azufre equivalentes (SO<sub>2</sub> eq).

La categoría de acidificación se emplea el modelo de Base de Saturación (BS) como indicador para expresar acidez. BS es el grado en el que la adsorción de un suelo está saturada con cationes básicos, distintos la hidrogeno y al aluminio. BS se define como la suma de sus cationes básicos (BCeq/kg suelo, dividida entre la capacidad de intercambio catiónico del suelo (CECeq/kg suelo), multiplicando por 100:

$$BS = \frac{BC}{CEC} = \frac{[K] + [Ca] + [Mg] + [Na]}{[H] + [K] + [Ca] + [Mg] + [Na]} \quad (18)$$

A mayor BS, mayor cantidad de cationes básicos presentes en el suelo, lo cual mejora la capacidad reguladora para los equivalentes ácidos (Luján, 2015; De Vries, et al., 2002).

A nivel de punto medio el potencial de acidificación terrestre se expresa en SO<sub>2</sub> equivalente y por lo tanto el área es independiente. El cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$TAP = \frac{FF_x}{FF_{SO_2}} \quad (19)$$

Donde el factor de acidificación a nivel punto medio (FF<sub>x</sub>) se obtiene de la siguiente manera:

$$FF_x = \frac{\sum_j(\Delta BS_j * A_j)}{FF_{SO_2}} \quad (20)$$

El factor de caracterización a nivel punto final para un sistema acidificante x (CF<sub>x</sub> en años. Kg<sup>-1</sup>) por una superficie forestal j (A<sub>j</sub> en m<sup>2</sup>) y el promedio de la densidad de especies terrestres SD<sub>terr</sub>/especies/m<sup>2</sup>) se calcula con la siguiente ecuación:

$$CF_x = \frac{d \text{ especies}}{dM_x} = SD_{terr} * \sum_j A_j * \frac{dDEP_j}{dM_x} * \frac{dBS_j}{dDEP_j} * \frac{dPDF}{dBS_j} \quad (21)$$

Donde,

A<sub>j</sub>: es el tamaño del área del bosque (m<sup>2</sup>).

SD<sub>terr</sub>: es la densidad de especies.

#### ✓ Eutrofización de agua dulce

Se puede definir la eutrofización como la acumulación de altas concentraciones de nutrientes como amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y fósforo (P) del medio ambiente acuático.

El enriquecimiento de estos nutrientes puede generar un cambio indeseable en la composición de especies y por lo tanto en la producción de biomasa. También puede provocar la contaminación de las aguas para consumo y el incremento de producción de biomasa en medios acuáticos lo que se traduce a un incremento de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) (Güereca, 2006).

El modelo de caracterización utilizado para esta categoría se denomina CARMEN (Cause Effect Relation Model to Support Environmental Negotiations). Este modelo calcula el cambio de la carga de nutrientes en las aguas subterráneas, aguas continentales y costeras, de igual manera modela el transporte de nutrientes agrícolas y la deposición atmosférica.

Con CARMEN es posible evaluar el factor de persistencia de eutrofización (FF<sub>x</sub> en año/km<sup>3</sup>), el cual hace referencia al incremento de concentración  $dC_{x,j}$  en t/km<sup>3</sup> en un sistema acuático expuesto a un aumento de la tasa de emisión  $dM_x(t/año)$ .

$$FF_x = \frac{dC_{x,j}}{dM_x} \quad (22)$$

Esta ecuación se aplica para evaluar el factor de destino del agua marina y de agua dulce por separado. Los resultados obtenidos utilizando el modelo revelan que una alta concentración de 10,000 g/L inhibe la aparición de cualquier especie de la macrofauna, incluso si todas las demás condiciones son óptimas. En un

rango entre 300 y 10, 000 g/L se presenta una disminución significativa del número de especies debido a que se presenta una ausencia de los requisitos esenciales para la vida acuática de invertebrados (Beusen, 2005)

#### ✓ **Formación de oxidantes fotoquímicos**

La formación de foto-oxidantes es la generación de compuestos químicamente reactivos como el ozono troposférico, por la acción de la luz del sol sobre ciertos contaminantes primarios. Estos compuestos pueden ser dañinos a la salud humana y al ecosistema y pueden también afectar los cultivos. Las tasas de formación de ozono en la tropósfera están regidas por las reacciones químicas complejas influenciadas por las concentraciones ambientales de los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), así como la particular mezcla COV, temperatura, luz solar y los flujos convectivos. El monóxido de carbono (CO) y el metano ( $\text{CH}_4$ ) pueden desempeñar también un papel en la formación de ozono.

#### ✓ **Agotamiento de agua**

El agua es un recurso natural que se encuentra distribuido de una manera no proporcional en el mundo y que a diferencia de otros recursos naturales no existe un mercado global que asegure su distribución.

De manera general, el uso del agua ha sido investigado en términos simples de ICV en unidades de masa o volumen, sin un análisis de caracterización posterior que pondere los diferentes caudales de uso para tener en cuenta las diferencias importantes entre los tipos fuentes de este recurso y los lugares de uso. Sin embargo la categoría de impacto de uso de agua, está estructurada para capturar el uso significativo del agua en las zonas de baja disponibilidad (Gómez, 2016)

El indicador que utiliza esta categoría de impacto consiste en la cantidad de agua utilizada. Se considera el tipo de recurso utilizado: agua de lago, agua de río, agua subterránea o de origen natural no especificada (Goedkoop, et al. 2013)

#### ✓ **Agotamiento de recursos minerales**

Los recursos minerales son formados a través de procesos geológicos que tienen una composición química característica, una estructura altamente ordenada y propiedades físicas específicas. Estos elementos estuvieron presentes cuando se formó la Tierra posteriormente al enfriarse, los procesos geológicos crearon áreas en las cuales quedaron concentrados, a estos depósitos formados en la naturaleza se les conoce como minas.

El hombre extraer primero los recursos con mayor calidad y deja para futuras extracciones los de menor calidad, por lo que el daño a los recursos será para las generaciones futuras las cuales tendrán que realizar mayores esfuerzos por extraer los recursos minerales que quedan. Este esfuerzo extra recibe el nombre de “energía de más”. Por lo que el potencial de agotamiento de recursos minerales se refiere a la energía de más por kilogramo de mineral extraído como resultado de la disminución del nivel de minerales.

El método analiza la extracción de minerales de depósitos naturales mediante el aumento de los costos de extracción de los productos básicos. Este costo puede ser calculado multiplicando el aumento del costo de la extracción por una cantidad que se extrae durante un periodo de tiempo determinado.

$$Agotamiento\ de\ RM = \sum_{t=1}^T \left( \frac{\Delta C_{kg}}{\Delta Y_{kg}} * P_{kg,t} * \Delta Y_{kg} * \frac{1}{(1+d)^t} \right) \quad (23)$$

Donde

$\Delta C_{kg}$ : es el incremento del costo (\$/kg).

$\Delta Y_{kg}$ : representa la masa del material extraído (kg).

$P_{kg,t}$ : la cantidad de recurso extraída en un año t (kg/año).

$d$ : es la tasa de disminución

$T$ : periodo considerado (años)

El daño ocasionado por la extracción de recursos minerales se expresa en US\$,  $\Delta C_{kg}$  representan el incremento del costo (\$/kg),  $\Delta Y_{kg}$  corresponde a la masa de material extraído (kg),  $P_{kg,t}$  la cantidad de recurso extraído en un año t(kg/año),  $d$  es la tasa de disminución y el  $T$  el periodo considerado (años).

El factor de caracterización para la extracción de recursos minerales expresados en términos de masa se define como:

$$CF_{kg} = \sum_{t=1}^T (MCl_{kg} * P_{kg,t} * \frac{1}{(1+d)^t}) \quad (24)$$

Donde

$MCl_{kg}$ : se refiere al incremento en el costo marginal (\$/kg<sup>2</sup>)

La metodología de ReCiPe se enfoca en el agotamiento de depósitos de diversos minerales tomando en cuenta la distribución geológica real de los metales y se expresa en Fe-equivalente (Goedkoop, et al., 2013)

### ✓ **Agotamiento de combustibles fósiles**

La evaluación de esta categoría se basa en el cambio proyectado de la extracción de recursos de fuentes convencionales a fuentes no convencionales. Esta categoría de impacto está relacionada con el concepto de agotamiento de recursos y energía de más. En este caso se refiere a la energía de más por MJ, kg o m<sup>3</sup> de combustible fósil extraído como resultado de la disminución de la calidad de los recursos.

Para efectos del análisis es necesario expresar el resultado en kg de petróleo, para lo cual se debe contar con la densidad del recurso. La densidad del petróleo convencional puede variar entre 800 y 950 kg/m<sup>3</sup>. Como promedio, se toma la densidad de 850kg/m<sup>3</sup>. Un barril de petróleo contiene como un estándar 159 litros (Lujan, 2015).

El factor de caracterización del petróleo se calcula mediante la siguiente expresión

$$CF_{kg.oil} = \sum_T \frac{P_{kg,t} * MCl_{kg,t}}{(1 + d)^t} \quad (25)$$

Donde

$d$ : corresponde al volumen del barril de petróleo

$MCl_{kg,t}$ : es el incremento en el costo marginal

$P_{kg}$ : Se refiere a la producción anual de petróleo en el año base