



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA EN ENERGÍA – ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA EN MÉXICO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

DAYANA HERNÁNDEZ PERAZA

TUTOR PRINCIPAL

DR. EDGAR SANTOYO CASTELAZO

SECRETARÍA DE ENERGÍA

CIUDAD DE MÉXICO, ENERO, 2019



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. EDGAR ROLANDO SANTOYO GUTIÉRREZ

Secretario: DRA. CECILIA MARTÍN DEL CAMPO MÁRQUEZ

Vocal: DR. EDGAR SANTOYO CASTELAZO

1^{er.} Suplente: DR. HÉCTOR MIGUEL AVIÑA JIMÉNEZ

2^{d o.} Suplente: DR. EDUARDO GONZÁLEZ PARTIDA

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, Cd. Mx, 2019.

TUTOR DE TESIS:

DR. EDGAR SANTOYO CASTELAZO

FIRMA

PENSAMIENTO

“Nosotros confiamos en la humanidad, confiamos en el hombre, y la humanidad no se dejará aniquilar, ni dejará que aniquilen su naturaleza, sus aguas, sus mares, sus recursos”

Fidel Castro Ruz

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo y patrocinio, que a través de la beca proporcionada me permitió realizar estos estudios de maestría.

Quiero agradecer a los profesores de la maestría, especialmente a mi tutor el Dr. Edgar Santoyo Castelazo por su apoyo incondicional, siempre con una respuesta a mis infinitas preguntas, al Dr. Edgar Rolando Santoyo Gutiérrez por sus sabios consejos sobre estadística y geotermia en general, y especialmente al Dr. Víctor Rodríguez Padilla quien esencialmente dedicó mucho tiempo a enseñarme cómo funciona México.

Una mención especial para Elisa que me ayudó mucho en la comprensión del software Gabi, a la Mtra. Mirna Guevara siempre amable y dispuesta a ayudar.

Resumen

El cambio climático se ha venido estableciendo como uno de los retos trascendentales para las sociedades actuales. El enfrentamiento al cambio climático hace preciso un cambio en los sistemas energéticos actuales. Energía y cambio climático son dos caras de una idéntica moneda, lo que requiere tomar disposiciones difíciles porque por un lado el cambio climático tendrá importantes efectos sobre el bienestar humano, pero en contraste, el sector energético garantiza la cobertura de necesidades humanas básicas.

Un futuro sostenible implica reforzar el ahorro energético y apoyar las tecnologías energéticas con bajas o nulas emisiones de CO₂, sobre todo las tecnologías basadas en energías renovables (ER). En el escenario mexicano actual se impone un cambio en las medidas y en el modo de actuar, por lo que la metodología de análisis de ciclo de vida toma vital importancia en el camino hacia la sostenibilidad.

México ha dado pasos en esa dirección con el desarrollo de un marco legal apropiado que hace énfasis en el uso de energías renovables dentro de la matriz energética. La energía geotérmica es una energía renovable que se obtiene mediante el aprovechamiento del calor natural del interior de la tierra que se transmite a través de los cuerpos de roca caliente o reservorios por conducción y convección, donde se suscitan procesos de interacción de fluidos y rocas, dando origen a los sistemas geotérmicos,

México cuenta con un gran potencial instalado de este tipo de energía, ocupando la séptima posición a nivel mundial, pero aún queda una gran cantidad de recursos geotérmicos sin explotar, por lo que este tipo de trabajo de investigación es de vital importancia para fomentar el uso de este tipo de energía a nivel nacional. Utilizando la metodología de análisis de ciclo de vida para evaluar la sustentabilidad de la producción de energía geotérmica con el fin de identificar

barreras y oportunidades que equiparen la producción de este tipo de energía a las mejores prácticas internacionales.

En México, donde debido a la Ley de Energía Geotermia (LEG), se espera un aumento en el desarrollo de proyectos geotérmicos y en el mundo en el que el potencial de los proyectos de energía geotérmica podría desempeñar un papel clave en la diversificación de la matriz energética mundial.

En el presente trabajo se realiza el análisis de ciclo de vida de una central geotermoeléctrica de flasheo simple con una capacidad instalada de 25 MW en territorio mexicano.

El objetivo principal es evaluar al sistema geotermoeléctrico con la metodología de ACV y conocer los impactos ambientales potenciales para la planta de producción geotermoeléctrica. Los resultados obtenidos fueron 195 g de CO₂- eq./kWh de emisiones de GEI para la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global (GWP), por sus siglas en inglés. Este valor se encuentra dentro del rango de valores publicados en otros estudios, los que se describen detalladamente en el texto.

Se realizaron dos análisis de sensibilidad, en el caso A es la mezcla del diesel utilizado en la perforación con un 10% de etanol. Mientras que para el caso B se redujeron las emisiones de la fase de operación al percentil 25 de la distribución considerada para el estudio. Las modificaciones se vieron reflejadas en la disminución de los impactos ambientales, para la fase de construcción de pozos geotérmicos y de operación de la planta. En la última fase se realizó una comparación entre las tecnologías geotérmicas y otras tecnologías de generación de electricidad y de los resultados del estudio con otros reportado para diferentes países.

Las emisiones provenientes de la etapa de operación son los principales responsables de los impactos ambientales Potencial de Calentamiento Global (GWP), Potencial de Acidificación: Acidification Potential (AP) y Potencial de

Creación de Oxidantes Fotoquímicos (POCP), mientras que las fases de mantenimiento y construcción tienen su mayor impacto ambiental en el Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina (MAETP).

Entre las recomendaciones que se proponen están considerar por el interés para la generación eléctrica las demás tecnologías de producción de energía eléctrica basadas en la geotermia instaladas en el país ya que este estudio se realizó para una planta geotermoeléctrica de flasheo simple. La implementación de esta información durante el proceso de toma de decisiones entre la compensación de los impactos ambientales y socioeconómicos de los diferentes recursos energéticos contribuiría a la evaluación de la sostenibilidad de la diversificación de la matriz energética.

Índice

Pensamiento	iii
Agradecimientos	iv
Resumen	v
Acrónimos	xii
Índice de figuras	xvi
Índice de tablas	xvii
1. Introducción	3
2. Características generales de la energía geotérmica.....	8
2. 1 Contexto energético mundial.....	8
2. 2 Principios de desarrollo sostenible y energía geotérmica	9
2. 3 Introducción a la geotermia.....	10
2. 4 Marco normativo de la energía geotérmica en México.....	12
2. 5 Efectos ambientales de la energía geotérmica.....	13
2. 6 Barreras y limitantes a la energía geotérmica en México.....	14
2. 7 Principales beneficios y desventajas del desarrollo geotérmico	14
2. 9 Energía geotérmica en México	16
3. La energía geotérmica como fuente de generación de electricidad	19
3. 1 Yacimientos geotérmicos.....	20
3. 2 Generación de electricidad.....	20
3. 2. 1. Sistemas de vapor seco	21

3. 2. 2. Sistemas de ciclo binario	22
3. 2. 3. Sistema de evaporación súbita o flasheo simple	22
3. 3 Sistemas de flasheo simple	23
3. 3. 1. Componentes de una central geotérmica de flasheo simple	24
4. Introducción a la metodología de análisis de ciclo de vida	26
4. 1 Antecedentes del concepto de análisis de ciclo de vida	26
4. 3 Definición de análisis de ciclo de vida	28
4. 3. 1. Objetivo y alcance del estudio	31
4. 3. 2. Análisis de inventario (ICV)	31
4. 3. 3. Análisis de impacto (AICV)	32
4. 3. 4. Interpretación de resultados	32
4. 4 Softwares de análisis de ciclo de vida	33
4. 5 Base de datos Ecoinvent	35
4. 6 Metodología para la evaluación de impacto CML	36
4. 7 Limitaciones del Análisis de Ciclo de Vida	38
4. 8 Estudios de análisis de ciclo de vida en México	38
5. Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de una planta de generación geotérmica instalada para la generación eléctrica en México	40
5. 1 Objetivo de estudio	40
5. 2 Alcance	41
5. 3 Unidad funcional	42

5. 4 Vida útil.....	42
5. 5 Límites del sistema.....	42
5. 6 Hipótesis y limitaciones.....	43
5. 7 Consideraciones.....	44
5. 8 Análisis y tratamiento de datos.....	45
5. 9 Descripción del análisis de inventario.....	48
5. 4 Evaluación de impactos ambientales.....	55
6. Análisis de resultados.....	56
6. 1 Caso base.....	56
6. 2 Interpretación del caso base.....	59
6. 2. 1 Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP elements).....	59
6. 2. 2 Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos Fósiles (ADP fossil).....	59
6. 2. 3 Potencial de Acidificación (AP).....	60
6. 2. 4 Potencial de Eutrofización (PE).....	60
6. 2. 5 Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce (FAETP).....	60
6. 2. 6 Potencial de Calentamiento Global (GWP).....	60
6. 2. 7 Potencia de Toxicidad Humana (HTP).....	61
6. 2. 8 Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina (MAETP).....	61
6. 2. 9 Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP).....	61
6. 2. 10 Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP).....	62
6. 2. 11 Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TETP).....	62

6. 3 Resumen del análisis del caso base	62
6. 4 Comparación con otras tecnologías de generación de electricidad a partir de la geotermia.....	63
6. 5 Análisis de sensibilidad	64
6. 5. 1 Caso A.....	65
6. 5. 2 Caso B.....	67
6. 6 Comparación con estudios similares para diferentes tecnologías de generación eléctrica.....	69
7. Conclusiones y recomendaciones	70
7.1 Caso Base	70
7.2 Análisis de sensibilidad.....	71
7.3 Recomendaciones	71
Anexo 1: Análisis de las contribuciones de los pozos geotérmicos al ciclo de vida de la planta geotermoeléctrica. Fuente: Elaboración Propia	84
Anexo 2. Análisis de la fase de mantenimiento de la planta de producción geotermoeléctrica.....	87

Acrónimos

ACV	Análisis del Ciclo de Vida
ADP (siglas en inglés)	Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos: Abiotic Resource Depletion Potential
AP (siglas en inglés)	Potencial de Acidificación: Acidification Potential
BD	Base de Datos
CF	Combustibles Fósiles
CML (siglas en inglés)	Instituto de Ciencias Ambientales de Leiden: del holandés Centrum Voor Milieuwetenschappen Leiden
CONACyT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
EICV	Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida
EP (siglas en inglés)	Potencial de Eutrofización: Eutrophication Potential
ER	Energías Renovables
ETP (siglas en inglés)	Potencial de Ecotoxicidad: Eco-Toxicity Potential

FAETP (siglas en inglés)	Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce: Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential
GaBi	Ciclo de Vida de Ingeniería: del alemán Ganzheitlichen Bilanzierung
GEI	Gases Efecto Invernadero
GWP (siglas en inglés)	Potencial de Calentamiento Global: Global Warming Potential
HTP (siglas en inglés)	Potencial de Toxicidad Humana: Human Toxicity Potential
IA	Impactos Ambientales
ICV	Inventario del Ciclo de Vida
IEA (siglas en inglés)	Agencia Internacional de Energía: International Energy Agency
INERE	Inventario Nacional de Energías Renovables
IPCC (siglas en inglés)	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático: Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA (siglas en inglés)	Agencia Internacional de Energías Renovables: International

	Renewable Energy Agency
ISO (siglas en inglés)	Organización Internacional para la Estandarización: International Organization for Standardization
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
LEG	Ley de Energía Geotérmica
LCA (siglas en inglés)	Análisis del Ciclo de Vida: Life Cycle Assessment
LCC (siglas en inglés)	Análisis de Costo del Ciclo de Vida
LCI (siglas en inglés)	Análisis de Inventario del Ciclo de Vida: Life Inventory Analysis
LCIA (siglas en inglés)	Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida: Life Cycle Impact Assessment
LGCC	Ley General del Cambio Climático
MAETP (siglas en inglés)	Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina: Marine Aquatic Ecotoxicity Potential
NREL (siglas en inglés)	Laboratorio Nacional de Energía Renovable: National Renewable Energy Laboratory
ODP (siglas en inglés)	Potencial de Agotamiento de la

	Capa de Ozono: Ozone Depletion Potential
PEAER	Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energía Renovables
POCP (siglas en inglés)	Potencial de Creación de Oxidantes Fotoquímicos: Photochemical Oxidants Creation Potential
PRODESEN	Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional
RE	Reforma Energética
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente Y Recursos Naturales
SENER	Secretaria de Energía
UNEP (siglas en inglés)	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente: United Nations Environment Programme
WEC (siglas en inglés)	Consejo Mundial de Energía: World Energy Council

Índice de figuras

Ilustración 1. Ubicación de las plantas de energía geotérmica en México	17
Ilustración 2. Principio de funcionamiento de los tres tipos de centrales geotérmicas.....	23
Ilustración 3. Esquema de la planta condensación con una sola presión de admisión.....	23
Ilustración 4. Las fases de un ACV determinadas por las normas ISO	29
Ilustración 5. Etapas de un análisis de ciclo de vida	30
Ilustración 6. Sistema y límites del sistema basado en	43
Ilustración 7. Emisiones normalizadas de la etapa de operación.....	46
Ilustración 8. Datos de generación anual en MWh De acuerdo a INEGI (INEGI, 2017).....	48
Ilustración 9. Resultados del ACV obtenidos para cada una de las categorías de impacto de la planta geotermoeléctrica para el Caso Base.	58
Ilustración 10. Promedio de emisión de g CO ₂ /kWh para tecnologías de producción de energía eléctrica a partir de la geotermia.	63
Ilustración 11. Comparación de impactos ambientales potenciales entre Caso Base y Caso mezcla de diesel con 10% de etanol.....	66
Ilustración 12. Comparación de impactos ambientales potenciales entre Caso Base y Caso Reducción de Emisiones.....	67
Ilustración 13. Impactos ambientales potenciales GWP medido en g de CO ₂ eq/kWh)	69

Índice de tablas

Tabla 1. Mediana de las emisiones en la etapa de operación.	47
Tabla 2. Datos específicos del sitio recopilados para la normalización del inventario para las etapas de construcción y operación. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 3. Emisiones consideradas para la parametrización del inventario de las etapas de operación.....	50
Tabla 4. Flujos estimados para la etapa de operación	51
Tabla 5. Flujos estimados de las etapas de construcción y mantenimiento presentados por kWh.	54
Tabla 6. Impactos Ambientales potenciales de las etapas del Caso Base, valores porcentuales.	57
Tabla 7. Relación de cambio de los impactos ambientales entre el caso base y el caso A	66
Tabla 8. Relación de cambio de los impactos ambientales entre el caso base y el caso B	68

1. Introducción

El cuidado y protección del Medio Ambiente es el principal reto al que nos enfrentamos en los últimos años. Los efectos que el desarrollo de la sociedad actual está provocando sobre el planeta comienzan a ser conocidos y cada vez son más las acciones dirigidas a atenuar o evitar estos efectos negativos. El uso indiscriminado de los combustibles fósiles ha sumido al mundo en un caos energético, México no está exento de esta problemática, por lo que se impone diversificar su matriz energética.

La energía geotérmica se muestra como una de las energías más prometedoras dentro de las fuentes de energía renovables. El mundo se encuentra en una transición hacia una economía baja en carbono y México no es la excepción. La lucha contra el cambio climático, la disponibilidad de recursos para financiar proyectos de energías renovables, los nuevos desarrollos tecnológicos y la volatilidad e incertidumbre de los precios del petróleo, son solo algunos de los factores que impulsan este cambio (Urrutia, 2017).

La energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la tierra (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2014) es una energía renovable que se obtiene mediante el aprovechamiento del calor natural del interior de la tierra que se transmite a través de los cuerpos de roca caliente o reservorios por conducción y convección, donde se suscitan procesos de interacción de fluidos y rocas, dando origen a los sistemas geotérmicos. Dentro de la amplia gama de energías renovables la energía geotérmica es la que ha demostrado una mayor madurez tecnológica con un importante soporte al desarrollo sustentable de la humanidad y con una contribución actual en la producción de electricidad a nivel mundial del 0.4% (Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010).

En el caso específico de México debido a las reformas al marco regulatorio, la política de aumentar la participación de las energías renovables en la matriz energética del país y la necesidad de reducir emisiones de gases efecto invernadero (SENER, 2017a), hacen que sea necesario, dada la importancia y favorables características de estos recursos energéticos en México, desarrollar una estrategia para aprovecharlos a su máxima capacidad.

La metodología de análisis de ciclo de vida es una herramienta de diseño que investiga y evalúa los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia: extracción, producción, distribución, uso y fin de vida (reutilización, reciclaje, valorización y eliminación/disposición de los residuos/desecho).

El análisis de ciclo de vida es una herramienta esencial en la evaluación del impacto ambiental de las nuevas tecnologías energéticas, principalmente a la hora de establecer la reducción neta de las emisiones de GEI y evaluar la sostenibilidad de dichas tecnologías.

El término desarrollo sostenible surgió por primera vez con la publicación del informe Brundtland en 1987 (ONU, 1987), allí el desarrollo sostenible se define como el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades desde entonces el desarrollo sostenible ha estado recibiendo mayor atención y la importancia de la sostenibilidad del uso de los recursos naturales se ha vuelto cada vez más clara (Axelsson, 2010).

La energía es uno de los componentes más críticos de la sostenibilidad (Shortall & Kharrazi, 2017), por lo que el uso sostenible de los recursos geotérmicos es particularmente relevante, dado que muchos países han adoptado estrategias de energía renovable (Malafeh & Sharp, 2015).

En este momento, México cuenta con compromisos internacionales que debe cumplir en materia de reducción de emisiones, algunos de ellos derivan de la Ley

General de Cambio Climático y la Ley de Transición Energética. Ambos instrumentos jurídicos buscan que dicha reducción se genere a través de la implementación de nuevas tecnologías o actividades (Bruni, 2014).

Con la entrada en vigor de la Ley de Energía Geotérmica (LEG) se vio renovado el interés en el desarrollo y aprovechamiento de los recursos geotérmicos del país, a través del reconocimiento, la exploración y explotación de los recursos geotérmicos. Esta ley tiene como propósito regular el reconocimiento, la exploración y la explotación de recursos geotérmicos para el aprovechamiento de la energía térmica del subsuelo dentro de los límites del territorio nacional. De esta manera, se establecen las reglas para el registro de reconocimiento, la emisión de permisos de exploración, así como concesiones de explotación (LEG, 2014). Se prevé que la generación eléctrica con geotermia se incremente 364, 8% para el año 2031 (SENER, 2017b).

En este contexto toma relevancia la metodología de análisis de ciclo de vida, misma que permite evaluar la sustentabilidad de la producción de energía geotérmica con un enfoque multidisciplinario (Baumann et al., 2004).

México ocupa el séptimo lugar mundial en producción de energía geotérmica y cuenta con planes de expansión de dicha fuente de energía (SENER, 2017a), por lo que se hace crucial definir hasta qué punto es sostenible la producción de energía geotérmica para producir electricidad a gran escala. La metodología de análisis de ciclo de vida ha demostrado efectividad en este tipo de proyectos.

Se carece de investigaciones que evalúen los impactos ambientales de las plantas de energía geotérmica en México durante todas las etapas de su ciclo de vida: extracción, producción, distribución, uso y fin de vida.

Por lo que se propone mediante el uso de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida es posible demostrar la sostenibilidad una planta de producción geotermoeléctrica con 25 MW de capacidad instalada.

Para llevar a cabo la investigación propuesta se proponen los siguientes objetivos como objetivo general:

Desarrollar el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de una central geotermoeléctrica de flasheo simple con 25MW de capacidad instalada.

Como objetivos específicos se propone:

1. Realizar el inventario del ciclo de vida de una central geotermoeléctrica.
2. Elaborar la estructura del ciclo de vida de una central geotermoeléctrica.
3. Aplicar la herramienta de análisis del ciclo de vida para evaluar la sostenibilidad de una central geotermoeléctrica.

Capítulos de la tesis:

Para conseguir los objetivos propuestos se han desarrollado distintos trabajos, los cuales dan contenido a los diferentes capítulos de esta tesis. A continuación, se describe brevemente el trabajo realizado en cada uno de ellos.

En el capítulo I se realiza una breve introducción al tema y se trazan las líneas a seguir por la investigación.

En el capítulo II se presenta el desarrollo de la energía geotérmica y su uso actual en el mundo haciéndose énfasis en el caso específico de México, describiendo los cuatro campos geotérmicos en operación y se realiza una descripción cronológica de cómo ha evolucionado el marco normativo mexicano con respecto al uso de la energía geotérmica.

En el capítulo III fruto de la revisión bibliográfica se dan a conocer los aspectos más relevantes relacionados con producción de electricidad a partir de la energía geotérmica, así como la descripción de los diferentes tipos de tecnologías para la producción de energía eléctrica a partir de la geotermia.

En el capítulo IV se presenta el estado del arte de la metodología del análisis de ciclo de vida.

En el capítulo V se realiza una caracterización del caso de estudio, en este capítulo se hace una descripción detallada del escenario base y de la metodología seguida para la búsqueda de los datos.

En el capítulo VI se presenta el análisis de inventario y el modelo de ciclo de vida de la central geotermoeléctrica objeto de estudio.

Mientras que el capítulo VII se muestran las conclusiones derivadas de los distintos trabajos realizados. Estas se expondrán en forma de conclusiones generales que respondan a los objetivos principales propuestos, seguidamente se presentarán diferentes recomendaciones surgidas como consecuencia de los trabajos desarrollados en la presente tesis de maestría. incluyendo las limitaciones encontradas en el desarrollo del estudio y lo que se espera para próximos trabajos.

Como anexos a la tesis se presentan tablas de datos que por sus características y dimensiones no aparecen incluidas en el cuerpo de la tesis. Se incluyen además gráficas resultado del análisis de ciclo de vida de la central geotermoeléctrica analizada que complementan el análisis descrito en el texto. El anexo 1 está constituido por un análisis de las contribuciones de los pozos geotérmicos al ciclo de vida de la planta geotermoeléctrica mientras que en el anexo 2 se describen los impactos ambientales potenciales de la fase de mantenimiento de la planta de producción geotermoeléctrica.

2. Características generales de la energía geotérmica

La situación energética a nivel global producto del agotamiento de los combustibles fósiles y el aumento de las consecuencias asociadas al cambio climático son temas con respecto a los cuales desde hace algunos años la comunidad internacional ha venido realizando labores en la búsqueda de soluciones. Estas acciones buscan reducir los Gases de Efecto Invernadero (GEI) considerados como los responsables del calentamiento global que a su vez, provocan el cambio climático (Ferreira, 2014).

De acuerdo a estudios realizados por (Labandeira et al., 2012), las energías renovables pueden permitir la reducción a gran escala de las emisiones de GEI si se convierten en alternativas económica y técnicamente viables a las fuentes energéticas fósiles convencionales. En el contexto energético mundial actual que será descrito a continuación es necesario un cambio en la política energética y en el manejo de las fuentes de energía donde el uso de las energías renovables juegue un papel fundamental, ante el inminente agotamiento de los combustibles fósiles.

2. 1 Contexto energético mundial

En 2017, la producción mundial de energía primaria totalizó en 13, 760. 81 millones de toneladas equivalentes de petróleo (MMtep) (Sener, 2017), lo que significó un incremento con respecto a los años anteriores. Dentro de los cambios en la canasta de producción primaria destacó el incremento en la producción de petróleo y la participación de energías renovables, ambos ganaron 3. 6 puntos porcentuales de 2014 a 2015, el principal incremento se presentó en las renovables (IEA, 2017).

Las exportaciones totalizaron 5, 616. 96 MMtep (primarias y secundarias) (SENER, 2017b), mientras que el número de importaciones a nivel mundial disminuyó en un 0. 7% (IEA, 2017) ya que se redujeron las importaciones de crudo las cuales tuvieron una caída de 1. 5% con respecto al año anterior. La oferta interna de energía bruta creció a nivel mundial en 1.2 %.

El consumo mundial de energía creció 1. 4% en 2016, esto se debió principalmente al incremento en el consumo de carbón y sus derivados con 2. 3%, al de petrolíferos con 1. 8% y al de electricidad con 1. 7%. Los tipos de energías renovables que tuvieron un incremento fueron la solar y la eólica con un 5. 9% que la registrada en 2015 (SENER, 2017a).

De acuerdo a con la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2017) el principal sector de consumo a nivel mundial fue el industrial con 2, 751. 17 MMtep, con un 29. 2% del total, seguido por los sectores transporte con 2, 627. 02 MMtep, representando el 27. 9% y residencial con 2, 142. 13 MMtep constituyendo el 22. 7%.

El contexto energético actual y la creciente sensibilización ambiental de la sociedad han convertido a las energías renovables, junto con el ahorro y la eficiencia energética, en una de las principales opciones para dar respuesta a los problemas planteados para satisfacer las necesidades de suministro energético demandadas por la población.

2. 2 Principios de desarrollo sostenible y energía geotérmica

Los principios del desarrollo sostenible (ONU, 1987) en sus tres dimensiones ambiental, social y económico vinculados al desarrollo de la energía geotérmica alcanzan una nueva dimensión.

Desde el punto de vista de lo económico la geotermia es un recurso autóctono por lo que reduce la dependencia del petróleo lo que contribuye a la seguridad energética, el factor de disponibilidad de las plantas geotérmicas es muy alto

(90%) a diferencia de otras tecnologías (Di Pippo, 2012), el costo de este tipo de energía está muy por debajo de otras generadas por combustibles fósiles.

En cuanto a la sociedad la generación de energía geotérmica es una fuente de generación de empleo, y las plantas traen consigo un incremento en la inversión social a través del apoyo a comunidades en sus programas de desarrollo local.

En cuanto a lo ambiental el desarrollo geotérmico reduce la emisión de gases de efecto invernadero, la energía geotérmica es una fuente renovable que cuando se administra de forma racional su aprovechamiento es sostenible en el tiempo, requiere menos terreno en comparación con otras fuente de energía renovables y tiene compatibilidad con la biodiversidad, patrimonio natural autóctono, y ecoturismo.

2. 3 Introducción a la geotermia

El carácter finito de los energéticos fósiles, aunado a las grandes afectaciones ambientales resultantes de su explotación, han creado un cambio de conciencia internacional con una tendencia por aumentar la implementación de las energías renovables. Las fuentes renovables de energía constituyen una alternativa viable para llegar a una independencia energética fósil y una solución a la creciente demanda energética con apego a políticas y estándares ambientales internacionales.

Atendiendo a los compromisos establecido por México para alcanzar en el 2024 una diversificación energética del 35 % basada en energías renovables, se está dando impulso principalmente a las tecnologías solares, eólicas y geotérmicas. En el contexto geo-energético, México cuenta con una capacidad instalada por arriba de los 1, 000 Me para generar electricidad con energía geotérmica, ocupando el séptimo lugar en el mundo y el primero en América Latina (SENER, 2017b).

Con los cambios de paradigma y nuevas legislaciones derivadas de la Reforma Energética se espera impulsar el crecimiento e implementación de las energías

renovables con proyecciones más alentadoras, en donde se convierta a la industria geotérmica en una de las opciones tecnológicas importantes para apoyar la transición de las energías no-renovables a las fuentes renovables (Su, 2015).

La participación de la geotermia en la capacidad instalada mundial para el año 2016 fue de 0.6%, mientras que la participación en la generación de energía eléctrica mundial fue del 1.5% (SENER, 2017a). En México durante el 2017, el 21.08% de la energía eléctrica se generó a partir de fuentes limpias, de estas el 16.66% pertenece a las renovables y el otro 5.42% a otras limpias (SENER, 2017a). México, al haber sido un país precursor en la explotación de recursos geotérmicos en el mundo, tiene una amplia práctica en el aprovechamiento de sistemas hidrotermales (Santoyo-Gutiérrez, 2011).

En la década 2006-2016 la capacidad instalada de energía geotérmica en la república mexicana se redujo 0.5% anualmente, mientras que la geotermia disminuyó su participación en la matriz de generación eléctrica, aunque el país cuenta con 8 centrales geotermoeléctricas que representan el 1.2% de la capacidad instalada (SENER, 2017a). México ocupa actualmente el séptimo lugar mundial en capacidad geotérmica instalada con 926 MW (Richter, 2017).

De acuerdo con (Guzmán, 2011) la energía geotérmica ofrece ventajas ambientales y sociales por encima de los combustibles fósiles y muchas otras tecnologías renovables. Puede ser la fuente más limpia de carga base de energía renovable debido a sus bajas emisiones de GEI, su huella relativamente pequeña sobre la base de la tierra y su bajo impacto global, siempre que los procedimientos de perforación y reinyección y la gestión de fluidos residuales se hagan responsablemente. Sin embargo, al igual que con cualquier tecnología energética, los impactos ambientales y sociales relacionados con los proyectos geotérmicos deben estudiarse y manejarse durante la vida completa del proyecto para reducir posibles efectos adversos, incluyendo efectos sobre las comunidades y los ecosistemas (Dolezal & Majano, 2013).

2. 4 Marco normativo de la energía geotérmica en México

El desarrollo de la generación energética renovable es clave en la Estrategia Nacional de Energía (SENER, 2014), al realizar una revisión del documento saltan a la vista tres pilares claves: seguridad energética, eficiencia económica y productiva y sostenibilidad ambiental.

Por su naturaleza el desarrollo de la energía geotérmica depende tanto de la regulación del sector eléctrico como del uso del agua.

La Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y Financiamiento de la Transición Energética y su Reglamento (Mexicanos, 2009), (reformada en 2012). Tiene como objetivo regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y tecnologías limpias.

Por último, la Ley General de Cambio Climático firmada en el 2012 tiene como objetivo garantizar el derecho a un medio ambiente sano y establecer la concurrencia de facultades en la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático y la mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto Invernadero, entre otros.

El Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energías Renovables en México (GR, 2013) tiene el objetivo de cumplir las medidas establecidas en la legislación referente al aprovechamiento de las energías no fósiles y limpias, en particular hace hincapié en las acciones que se derivan de la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y Financiamiento de la Transición Energética y su Reglamento.

De forma general el análisis de las leyes mexicanas denota un fuerte impulso a las energías renovables en México, con énfasis en el aprovechamiento del recurso geotérmico, la reforma energética le ha dado un impulso importante, así como la creación del Centro Mexicano de Innovación en Energías Renovables (Gutiérrez-Negrín, 2015).

De estas acciones surgieron entonces dos leyes relacionadas con el sector eléctrico: la Ley de la Industria Eléctrica y la nueva Ley de Energía Geotérmica (Mexicanos, Ley de Energía Geotérmica, 2014), en esta última se establecen los requisitos y procedimientos para realizar las actividades de reconocimiento, exploración y explotación del recurso geotérmico.

Con el objetivo de promover y acelerar el uso y desarrollo de la Energía Geotérmica en México, en febrero del 2014 se funda el CEMIE-Geo como una alianza entre academia e industria con el apoyo de la SENER y el CONACyT. El consorcio está conformado por diferentes institutos de investigación científica, varias universidades, así como de compañías públicas y privadas. De esta manera se agrupa en el CeMIE-Geo la mayor parte de experiencia geotérmica del país (Rojas Hernández, 2016).

En México ante la apertura del mercado energético interno es factible la inversión en energías limpias, ambientalmente amigables que tributen al desarrollo del país, el cual tiene todo un marco legal que hace factible dichas inversiones.

2. 5 Efectos ambientales de la energía geotérmica

La producción de energía geotérmica al igual que cualquier alteración a los ecosistemas ocasiona diversos impactos ambientales, estos efectos no pueden ser excluidos al analizar la obtención de este tipo de energía, dentro de los más importantes podemos citar De acuerdo a estudios (González Acevedo, 2017).

- Los cambios en el paisaje y el uso del suelo
- Residuos sólidos
- Ecología
- Subsistencia del terreno y sismicidad (Barbier , 2002)
- Ruido (Brophy , 1997)
- Emisiones a la atmosfera (Phillips, 2010)
- Contaminación de las aguas superficiales y subterráneas (Barbier , 2002)

2. 6 Barreras y limitantes a la energía geotérmica en México

Las barreras para el desarrollo se pueden dividir en tres grupos importantes: regulatorias, financieras y de capacidades. De acuerdo a (SENER, 2012) la situación energética actual de la república mexicana requiere de la búsqueda de alternativas para dar pasos en pos de la seguridad energética del país y hacia la descarbonización de la matriz energética, al amparo de la reforma energética se han venido implementando nuevas leyes y regulaciones para alcanzar este objetivo.

En el caso de la producción de energía geotérmica, México ocupa el séptimo lugar mundial en producción de energía geotérmica, con perspectivas de aumentar su capacidad instalada De acuerdo a los mapas de rutas tecnológicas publicados recientemente (SENER, 2017c) se espera aumentar la capacidad instalada para que en el año 2031 la generación de energía geotérmica alcance el 3% de la generación total del país (SENER, 2017), en este contexto toma relevancia la metodología de análisis de ciclo de vida, misma que permite evaluar la sustentabilidad de la producción de energía geotérmica con un enfoque multidisciplinario (Baumann & Tillman, 2004) que permita a la vez analizar de manera integral el proceso con el fin de identificar barreras y oportunidades que equiparen la producción de este tipo de energía a las mejores prácticas internacionales.

2. 7 Principales beneficios y desventajas del desarrollo geotérmico

Al consultar diversas fuentes bibliográficas (Fernández Muerza, 2006), (Barriga Grez, 2007) se pueden resumir las principales ventajas y desventajas del uso de la energía geotérmica como una fuente de energía ya que se considera limpia, flexible, confiable y abundante ofreciendo ventajas económicas y ambientales

sobre las tecnologías tradicionales incluyendo sobre algunas de energías renovables.

Para el caso particular de México, los indicadores que evalúan la sostenibilidad de la energía geotérmica son seleccionados de manera parcial (a partir de métodos de evaluación existentes sobre otros países). En términos reales, este proceso generalmente involucra a un gran número de partes interesadas con objetivos múltiples y a menudo contradictorios (Azapagic, A. y Perdan, S., 2005a y 2005b).

Por otra parte, en la mayoría de los estudios no se considera la presencia de externalidades, es decir el costo o beneficio asociado a una actividad económica concreta que recae indiscriminadamente sobre el medio ambiente y la sociedad y que no se incluye en el precio de mercado (implicando así un fallo de mercado). Esto resulta en una ineficiencia social como indican Caldés y Lechón (2010) a la hora de evaluar las tecnologías renovables o convencionales.

2. 8 Energía geotérmica en el mundo

Ante la crisis energética actual y el agotamiento de los combustibles fósiles ha aumentado el número de países que han incorporado la energía geotérmica a su matriz energética. Islandia y Nueva Zelanda son bien conocidas por sus éxitos en recurrir a sus recursos geotérmicos para superar las restricciones energéticas (Mims, 2010), las Filipinas ha explotado aproximadamente un 42 por ciento de la capacidad geotérmica estimada en el país.

México ha aprovechado casi el 60 por ciento de los recursos geotérmicos dentro de su territorio. Costa Rica y El Salvador están explotando entre un 20 y 30 por ciento de sus recursos. (Taylor, 2013) Algunos países en África, como Kenia, también se encuentran muy activos en el desarrollo de recursos geotérmicos. Indonesia tiene una cartera de proyectos geotérmicos de 3. 2 GW, más que cualquier otro país en el mundo. (NRDC, 2013).

Es evidente que el desarrollo geotérmico no se ha limitado meramente a algunas economías, países o regiones del mundo. La Agencia Internacional de la Energía (AIE, 2009) prevé que la energía geotérmica podría producir 1. 400 TWh de electricidad por año, o un 3, 5 por ciento de la generación eléctrica del mundo para el año 2050.

2. 9 Energía geotérmica en México

Las fuentes geotérmicas y eólicas son las fuentes de energía renovable no convencionales más importantes utilizadas en México. Si bien existe cierta tradición de uso directo de la energía geotérmica, principalmente relacionada con la balneología, el uso más importante es para la generación de electricidad (Flores et al., 2014)

Los inicios de la utilización de energía geotérmica en México para la producción de energía eléctrica se remontan a los años sesenta, en los que se comenzó a explotar el campo geotérmico de Pathé en el estado de Hidalgo. Estudios realizados por (DiPippo, 2012) exponen que México cuenta con una capacidad instalada total de 926 MW. Las plantas se agrupan en cinco lugares todos ellas propiedad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) como se muestra en la

ilustración1.



Ilustración 1. Ubicación de las plantas de energía geotérmica en México (DiPippo, 2012).

La CFE, organismo público a cargo de la generación, transmisión y comercialización de la energía eléctrica en México, opera cuatro campos geotérmicos, esos campos son los de Cerro Prieto, Baja California, Los Azufres, Michoacana. , Los Humeros, Puebla. , y Las Tres Vírgenes, Baja California Sur.

El campo de Cerro Prieto se localiza en la porción norte de México, muy cerca de la frontera con Estados Unidos, a unos 30 kilómetros al sureste de la ciudad de Mexicali, capital del estado de Baja California. Es el segundo campo más grande del mundo, sólo inferior al de The Geysers, en California, EUA, y se ubica prácticamente al nivel del mar. Es un campo de tipo sedimentario, en el cual los fluidos geotérmicos están alojados en rocas areniscas. La fuente de calor es una anomalía térmica formada por el adelgazamiento de la corteza terrestre Su capacidad instalada es de 720 MW. Las primeras unidades empezaron a operar en 1973 y las últimas en 2000. A la fecha cuenta con cuatro unidades de 25 MW, una unidad de 30 MW, cuatro de 37. 5 MW cada una, y otras cuatro de 110 MW cada una. Todas ellas son unidades a condensación. En Cerro Prieto la CFE opera un promedio de 168 pozos en producción continua, con una profundidad media de 2, 500 metros, que producen más de 52 millones de toneladas de vapor

al año a una tasa de 6 mil toneladas de vapor por hora (t/h). Hay en él una laguna de evaporación construida en una superficie de 14 kilómetros cuadrados, con la cual, y con 15 pozos inyectores, se dispone de los más de 70 millones de toneladas de salmuera que salen asociadas al vapor (GWh (Gutierrez-Negrin, 2007)

El campo geotérmico de Los Azufres está localizado en la parte central de México, en el Estado de Michoacán, a unos 250 kilómetros al occidente de la Ciudad de México, en un complejo volcánico a 2, 800 metros de altitud. Los Azufres es un campo de tipo volcánico cuyos fluidos geotérmicos están contenidos en rocas de tipo andesítico. La CFE opera en él una capacidad total de 188 MW mediante cinco unidades a condensación (una de 50 MW y cuatro de 25 MW cada una), siete unidades a contrapresión de 5 MW cada una y dos unidades de ciclo binario de 1. 5 MW cada una (Gutiérrez-Negrin, 2007).

Los Humeros es otro campo volcánico, ubicado en la parte oriental de la Faja Volcánica Mexicana en los límites de los estados de Puebla y Veracruz, en el interior de una caldera volcánica cuaternaria cuyas últimas erupciones ocurrieron hace 20 mil años. El campo se ubica a 2, 600 metros sobre el nivel del mar. La central geotermoeléctrica de Los Humeros está constituida por ocho unidades turbogeneradoras a contrapresión de 5 MW cada una (40 MW en total), la más reciente de las cuales entró en operación a fines de julio de 2007 (Gutiérrez-Negrin, 2007).

El campo geotérmico de Las Tres Vírgenes es igualmente un campo volcánico, pero éste ubicado en la parte media de la península de Baja California, fuera de la Faja Volcánica Mexicana, en el Estado de Baja California Sur. Los fluidos geotérmicos del yacimiento están alojados en rocas de tipo intrusivo (granodioritas), sobre yacidas por rocas vulcano-sedimentarias y volcánicas (Maya González & Gutiérrez Negrín, 2007). La central de Las Tres Vírgenes está constituida por dos unidades a condensación de 5 MW cada una, que entraron en operación en 2001.

Un quinto campo geotérmico identificado en México es el campo de Cerritos Colorados, conocido anteriormente como La Primavera, ubicado en la porción central del país al occidente de la Faja Volcánica Mexicana y prácticamente en la periferia de la ciudad de Guadalajara, Jal. El campo se ubica dentro de una caldera volcánica de unos 12 kilómetros de diámetro formada hace 120 mil años, la caldera de La Primavera, cuya última actividad es un domo riolítico de 20 mil años de antigüedad extruido en el borde oriental de la caldera (Mahood, 1980)

El potencial geotermoeléctrico del país con recursos de tipo hidrotermal es muy superior. Las reservas geotérmicas probadas y probables en los campos antes descritos, han sido estimadas en unos 430 MW adicionales. Los recursos de tipo hidrotermal, que se clasifican en recursos medidos, indicados e inferidos, suman otros 1200 MW, tomando en cuenta únicamente recursos de más de 150 °C de temperatura (Cemiego, 2018).

3. La energía geotérmica como fuente de generación de electricidad

La energía geotérmica se ha convertido en una de las fuentes de energía renovables que no deben ser ignoradas en el siglo XXI , como un recurso natural con una gran reserva en la tierra, De acuerdo a a cálculos teóricos, las reservas de energía en los 10 km superiores de la corteza terrestre son aproximadamente $3,6 \times 10^{14}$ GWh (Jianchao et al., 2018) . La energía geotérmica es el calor que se almacena en el subsuelo y es un recurso renovable que puede ser explotado de forma sostenible.

La humanidad tiene una larga historia de uso de energía geotérmica : usos directos, sistemas de calefacción urbana, plantas de generación eléctrica , bombas de calor geotérmicas, etc (Limberger et al., 2018). Hoy en día, la electricidad es una parte esencial de la vida moderna, pero a menudo se pasa por alto que la producción de calor representa más de la mitad del consumo mundial de energía final (OECD/ IEA, 2014). Las $\frac{3}{4}$ partes de esta demanda de calor es

actualmente satisfecha por los combustibles fósiles (OECD/ IEA, 2014) lo que causa un impacto significativo sobre el clima y el medio ambiente. Comparada con la energía eólica y solar, geotérmica la energía no puede verse afectada por los cambios en el clima y las estaciones y puede generar electricidad en cualquier momento y evitar la generación de residuos de electricidad que pueden generarse en la utilización de la energía eólica y la energía solar. Además, la energía geotérmica es estable, baja en carbono y tiene un alto factor de capacidad superior al 90% en muchos casos (Goldstein Barry et al., 2010).

3. 1 Yacimientos geotérmicos

Los yacimientos geotérmicos convencionales se clasifican De acuerdo a con los niveles energéticos de los recursos que albergan, es decir, de los fluidos en ellos contenidos. Por lo tanto se pueden clasificar De acuerdo a (Di Pippo, 2012) en:

- Yacimientos de alta entalpía en los que se cumplen las condiciones clásicas de existencia de un yacimiento y el foco de calor permite que el fluido se encuentre en condiciones de presión y alta temperatura (superior al menos a los 150°C). Las características termodinámicas del fluido permiten su aprovechamiento para producción de electricidad.

- Yacimientos de media entalpía en los que los fluidos se encuentran a temperaturas situadas entre los 100 y los 150°C, lo que permite su uso para producción de electricidad mediante ciclos binarios que, en general, tienen rendimientos algo inferiores.

- Yacimientos de baja entalpía, cuando la temperatura del fluido es inferior a los 100°C y su aplicación son los usos directos del calor (calefacción, procesos industriales y usos en balneoterapia).

3. 2 Generación de electricidad

Esta sección cubre las aplicaciones de producción de electricidad geotérmica y los mecanismos de conversión de energía geotérmica. Existen tres tipos de plantas para generar energía eléctrica procedente de los recursos geotérmicos, en función de las características y naturaleza del fluido geotermal disponible y la profundidad de este. El principio de funcionamiento de estas plantas es el siguiente: al sacar vapor o agua caliente desde depósitos geotérmicos se produce una fuerza que hace girar el generador de la turbina y producir electricidad. El agua geotérmica no usada se devuelve al depósito, mediante inyección, para ser recalentada y para mantener la presión necesaria. El tipo de planta depende además del estado del fluido almacenado en el yacimiento (vapor, agua líquida o una mezcla de ambos) y de su temperatura y presión (Camazón, 2009).

3. 2. 1 Sistemas de vapor seco

La planta usa un depósito de vapor con muy poca agua. El vapor se envía a través de tubos directamente a las turbinas, que manejan un generador eléctrico. En este sistema el vapor geotérmico no es mezclado con el agua. Los pozos de producción se perforan abajo de la capa conductora del agua freática, presurizado el vapor (180 °C - 350 °C) es traído a la superficie a alta velocidad, y pasado mediante una turbina de vapor para generar electricidad; usualmente, el vapor se pasa mediante un condensador para convertirla en agua (Santos et al., 2018).

El calor que se pierde se ventila mediante torres de enfriamiento, las eficiencias de conversión de energía son más bajas, alrededor 30%. La eficiencia y la economía de las plantas secas de vapor son afectadas por la presencia de gases no condensables tal como hidrógeno, dióxido de carbón y ácido sulfúrico. La presión de estos gases reduce la eficiencia de las turbinas, y además, la remoción de los gases sobre terrenos ambientales agrega al costo de operación. (Di Pippo & DiPippo, 2012)

3. 2. 2 Sistemas de ciclo binario

Se utiliza un depósito de agua con temperaturas entre 250 y 360°F. En este tipo de sistema, el agua geotérmica se pasa mediante un intercambiador de calor, donde su calor se transfiere en un segundo líquido, que tiene un punto de ebullición inferior al del agua (isobutano o isopentano) (Di Pippo, 2012).

3. 2. 3. Sistema de evaporación súbita o flasheo simple

Usa un depósito geotérmico constituido de agua a una temperatura entre 300 y 700 °F. En este tipo de sistema, el fluido se rocía en un tanque a presión baja, ocasionando que el fluido rápidamente se evapore. El vapor se usa entonces para mover la turbina. Hay comúnmente algún líquido que permanece en el tanque después de que el fluido se rocía para evaporarse. Si el líquido es lo suficientemente caliente, puede rociarse nuevamente en un segundo tanque para extraer aún más energía. Este sistema se usa donde el recurso hidrotérmico está en una forma líquida. El fluido se rocía en un tanque de destello, que tiene una presión inferior que la del fluido, ocasionando (o destello) rápidamente la evaporación. (Karlsdóttir et al., 2015).

La mayoría del fluido geotérmico no destella, y este fluido se reinyecta en el depósito. Alternativamente, si el fluido que permanece en el tanque tiene una temperatura suficientemente alta, puede pasarse en un segundo tanque, donde una reducción de presión induce un destellado adicional para evaporar. Este vapor, junto con la descarga desde la turbina principal, se usa para manejar una segunda turbina o la segunda etapa de la turbina principal para generar electricidad adicional; con lo cual se logra aumentar el rendimiento en un 20–25%, con un 5% de aumento en los costos de planta (Di Pippo & DiPippo, 2012).

En la ilustración 2 se muestra un esquema simplificado de las plantas geotérmicas descritas en el epígrafe anterior.

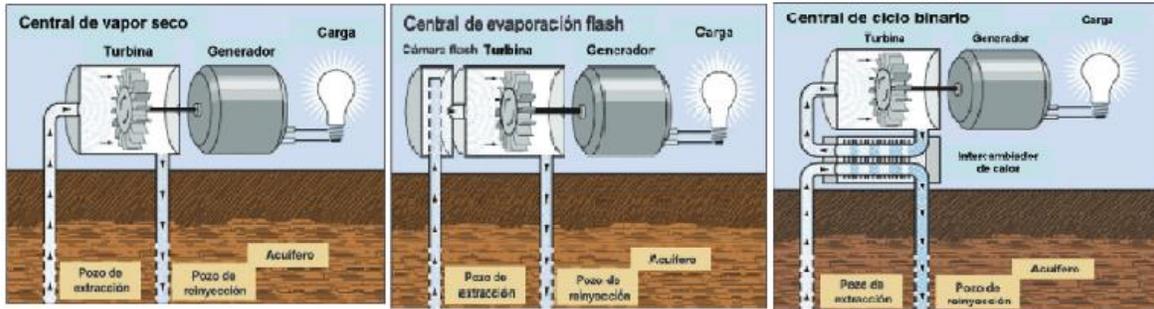


Ilustración 2. Principio de funcionamiento de los tres tipos de centrales geotérmicas (Barbier , 2002).

3. 3 Sistemas de flasheo simple

Las operaciones de la planta de flash simple, doble y triple se basan en el flasheo del fluido geotérmico para la generación de vapor, donde las configuraciones de flash doble y triple utilizan aún más el fluido geotérmico no utilizado para aumentar el rendimiento termodinámico y la producción de energía (Dincer, 2018).

En la ilustración 3 se observa el esquema simplificado de una planta de condensación de flasheo simple similar a la que se analiza en el presente estudio.

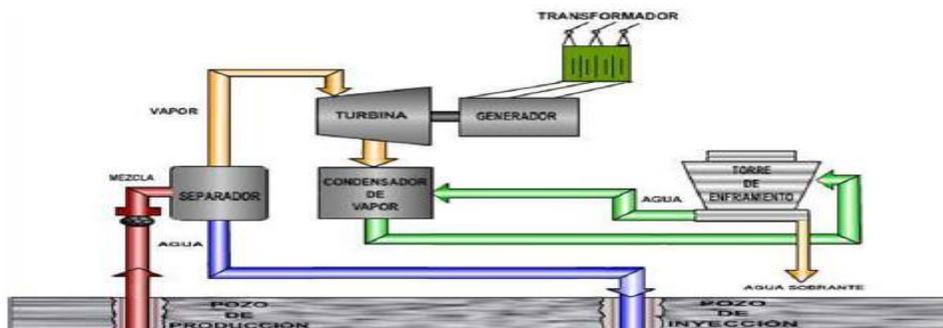


Ilustración 3. Esquema de la planta condensación con una sola presión de admisión (Barbier , 2002).

En el caso de los sistemas abiertos, son los de uso más extendido en el aprovechamiento de recursos geotérmicos de alta entalpía, y se emplean en el caso de fluidos geotérmicos formados por una mezcla vapor-líquido, con temperaturas que suelen oscilar entre 180 °C y 250°C. Alrededor del 29% de las plantas geotérmicas en general son plantas de flasheo simple y casi el 43% del total de la capacidad de energía geotérmica instalada en el mundo está relacionada con este tipo de energía geotérmica (Hancioglu, 2015). Por otra parte el uso cuidadoso de los recursos geotérmicos puede contribuir al desarrollo sostenible en todas las dimensiones y, como resultado, el desarrollo de la energía geotérmica está íntimamente relacionado con el movimiento hacia la sostenibilidad global. (Davidsdottir, 2012).

3. 3. 1 Componentes de una central geotérmica de flasheo simple

En la siguiente sección se presentan los componentes principales utilizados en plantas de flasheo simple actualmente instaladas De acuerdo a (Di Pippo, 2012)

Sistema de suministro de vapor:

- ✓ Válvula de control de boca de pozo.
- ✓ Vasijas separadoras.
- ✓ Separador Ciclónico con tanque recolector de salmuera.
- ✓ Válvula de retención de bola.
- ✓ Piping para el vapor con sistema de aislamiento ambiental.
- ✓ Removedor de Humedad.
- ✓ Colector/Estanque de vapor.
- ✓ Silenciadores para descarga atmosférica.
- ✓ Piping para salmuera con sistema de aislamiento.

Modulo turbina-generador:

- ✓ Turbina de vapor con accesorios.
- ✓ Material del Rotor; Acero Inoxidable (12% Cr, 6% Ni, 1, 5% Mo).

- ✓ Material de los alabes; Acero Inoxidable (13% Cr).
- ✓ Material del estator; Acero al carbón.
- ✓ Compresor de aire.
- ✓ Sistema de control.
- ✓ Generador de Electricidad con sistema de enfriamiento.
- ✓ Sistema de aceite de lubricación.

Módulo de condensación:

- ✓ Condensador c/bombas de condensador.
- ✓ Sistemas de remoción de gases no condensables.
- ✓ Eyectores de vapor.
- ✓ Bomba de Vacío.

Sistema de expulsión de calor:

- ✓ Torre de enfriamiento de agua.
- ✓ Bombas de agua de enfriamiento c/motor.
- ✓ Tratamiento de aguas para refrigeración.

Al realizar estudios de ciclo de vida debe describirse y diferenciarse bien el tipo de planta geotérmica ya que las características y componentes de esta varían dependiendo del tipo de fluido y temperatura del reservorio. En este capítulo se han descrito las características y el funcionamiento de una planta geotérmica de flasheo simple que es el objeto de estudio del análisis de ciclo de vida que se realiza a continuación.

En el siguiente capítulo se describe la metodología que se escogida para la evaluación de los impactos ambientales potenciales formulados para el presente estudio.

4. Introducción a la metodología de análisis de ciclo de vida

La situación energética actual de México requiere la búsqueda de alternativas para dar pasos hacia la seguridad energética del país y la descarbonización de la matriz energética. Al amparo de la reforma energética se han venido implementando nuevas leyes y regulaciones para alcanzar este objetivo.

De acuerdo con los mapas de ruta tecnológica publicados recientemente (SENER, , 2017c) se espera aumentar la capacidad instalada para que en el año 2031 la generación de energía geotérmica alcance el 3% de la generación total del país (SENER, 2017d).

En este contexto toma relevancia la metodología de análisis de ciclo de vida, que permite evaluar la sustentabilidad de la producción de energía geotérmica con un enfoque multidisciplinario (Baumann & Tillman, 2004) analizando de manera integral el proceso con el fin de identificar barreras y oportunidades que equiparen la producción de este tipo de energía a las mejores prácticas internacionales.

4. 1 Antecedentes del concepto de análisis de ciclo de vida

La metodología de análisis de ciclo de vida en el contexto energético global toma cada día mayor protagonismo, haciendo un análisis histórico (Linnanen, 1995) se refería a la gestión del ciclo de vida desde tres puntos de vista, el primero de como influía este conocimiento en la toma de decisiones de la empresa, el segundo desde el punto de vista ingenieril como se podía optimizar el impacto ambiental causado por un producto durante su ciclo de vida y el tercero y más importante como influía en el liderazgo creando una nueva cultura organizacional. De acuerdo a (Fava, 1997) era necesario con la gestión del ciclo de vida crear un vínculo entre el ciclo de vida ambiental y los criterios, estrategias y planes para así aumentar la organización de los negocios y lograr por ende mayores beneficios, (Finkbeiner et al., 1998) habla ya de la importancia de un enfoque integral hacia productos y sus

orígenes relacionados con las herramientas de gestión ambiental desde la perspectiva del ciclo de vida de los mismos; (Heiskanen, 2002) define el enfoque de ciclo de vida como una especie de planificador social en problemas medioambientales en lugar de la minimización directa de pasivos ambientales, mientras que (Hunkeler, 2004) menciona como la gestión del ciclo de vida (LCM) es un marco integrado de conceptos y técnicas para abordar cuestiones ambientales, económicas, tecnológicas, sociales, aspectos de productos, servicios y organizaciones. LCM, como cualquier otro patrón de gestión, se aplica de forma voluntaria y se puede adaptar a las necesidades y características específicas de las organizaciones individuales. En ese mismo año (Baumann & Tillman, 2004) dan una de las mejores definiciones de análisis de ciclo de vida hasta el momento definiéndola como una metodología orientada a sistemas para abordar las consecuencias ambientales asociadas con un producto o servicio. Se usa para estudios de los flujos de materiales y energía y sus impactos ambientales relacionados con un producto o servicio, es decir, desde la extracción de materia prima, hasta la producción y el uso, hasta la eliminación. El ACV, junto con el pensamiento del ciclo de vida, la gestión del ciclo de vida y la evaluación de la sostenibilidad del ciclo de vida, conforman la cartera de enfoques del ciclo de vida. Desde el punto de vista del análisis de ciclo de vida tiene como objetivo minimizar los impactos ambientales y las cargas socioeconómicas asociadas con un producto u organización durante todo su ciclo de vida y cadena de valor, mientras que (UNEP/SETAC, 2009) plantea que el análisis de ciclo de vida se puede utilizar para organizar, analizar y administrar productos relacionados información y actividades para la mejora continua de un producto o proceso, una forma de concretar la importancia del análisis de ciclo de vida en el contexto actual es la ofrecida por (Jensen, 2012) donde habla de la importancia de una integración sistémica del pensamiento del ciclo de vida en las empresas modernas con el objetivo de proporcionar a las sociedades bienes más sostenibles y servicios para administrar el ciclo de vida total de un producto con el objetivo de tener una cartera de producción más sostenible.

4. 3 Definición de análisis de ciclo de vida

En 1994, se estableció dentro de ISO el comité técnico TC207 relacionado con la normalización de herramientas ambientales, incluido el ACV. Dentro de la normalización ISO deberán distinguirse entre normativas e informes técnicos. En el día de hoy se han elaborado cuatro normativas relacionadas con el ACV:

1. ISO 14040 (Standard, 1997): Especifica el marco general, principios y necesidades básicas para realizar un estudio de ACV, no describiéndose la técnica del ACV en detalle
2. ISO 14041 (Standard, 1998): En esta normativa se especifican las necesidades y procedimientos para elaborar la definición de los objetivos y alcance del estudio y para realizar, interpretar y elaborar el informe del análisis del inventario del ciclo de vida,(LCI,por sus siglas en inglés)
3. ISO 14042 (Standard, 2000): En ella se describe y se establece una guía de la estructura general de la fase de análisis del impacto, AICV (LCIA). Se especifican los requerimientos para llevar a cabo un AICV y se relaciona con otras fases del ACV.
4. ISO 14043 (Standard, 2000): Esta normativa proporciona las recomendaciones para realizar la fase de interpretación de un ACV o los estudios de un ICV, en ella no se especifican metodologías determinadas para llevar a cabo esta fase (ISO-14043, 2000b).

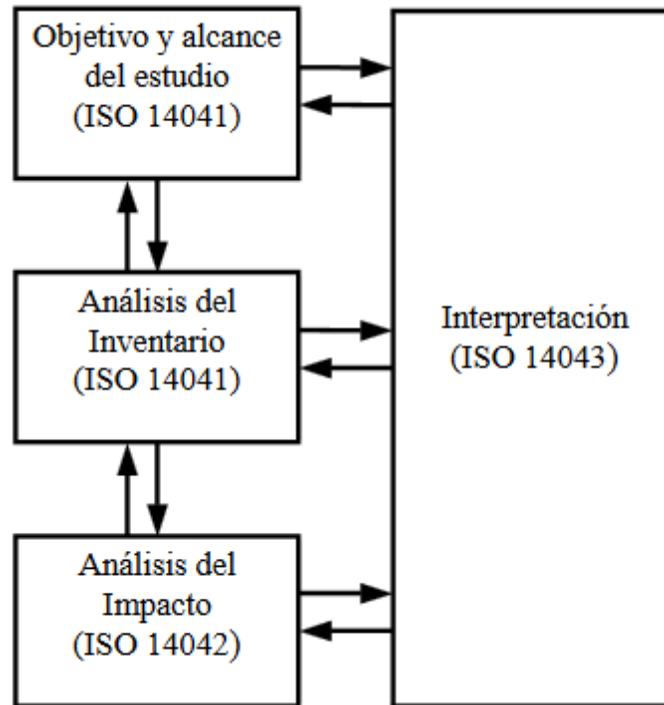


Ilustración 4. Las fases de un ACV determinadas por las normas ISO Fuente: Elaboración propia con datos de (ISO 1997)

El marco de referencia general ISO 14040 de un estudio de LCA consta de 4 etapas (ISO, 1997):

- ✓ Etapa 1. Definición del Objetivo y Alcance del ACV. En los objetivos se exponen los motivos por los que se desarrolla el estudio, la aplicación prevista y a quién va dirigido. El alcance consiste en la definición de la amplitud, profundidad y detalle del estudio.
- ✓ Etapa 2. Análisis de Inventario de Ciclo de Vida. Esta fase incluye la identificación y cuantificación de las entradas (consumo de recursos) y salidas (emisiones al aire, suelo y aguas y generación de residuos) del sistema del producto. Por sistema del producto se entiende el conjunto de procesos unitarios conectados material y energéticamente que realizan una o más funciones idénticas.

- ✓ Etapa 3. Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida. Durante esta etapa, utilizando los resultados del análisis de inventario, se evalúa la importancia de los potenciales impactos ambientales generados por las entradas y salidas del sistema del producto.
- ✓ Etapa 4. Interpretación, la cual incluye la combinación de los resultados de las dos etapas anteriores, con la finalidad de extraer, De acuerdo a con los objetivos y alcance del estudio, conclusiones y recomendaciones que permitan la toma de decisiones.

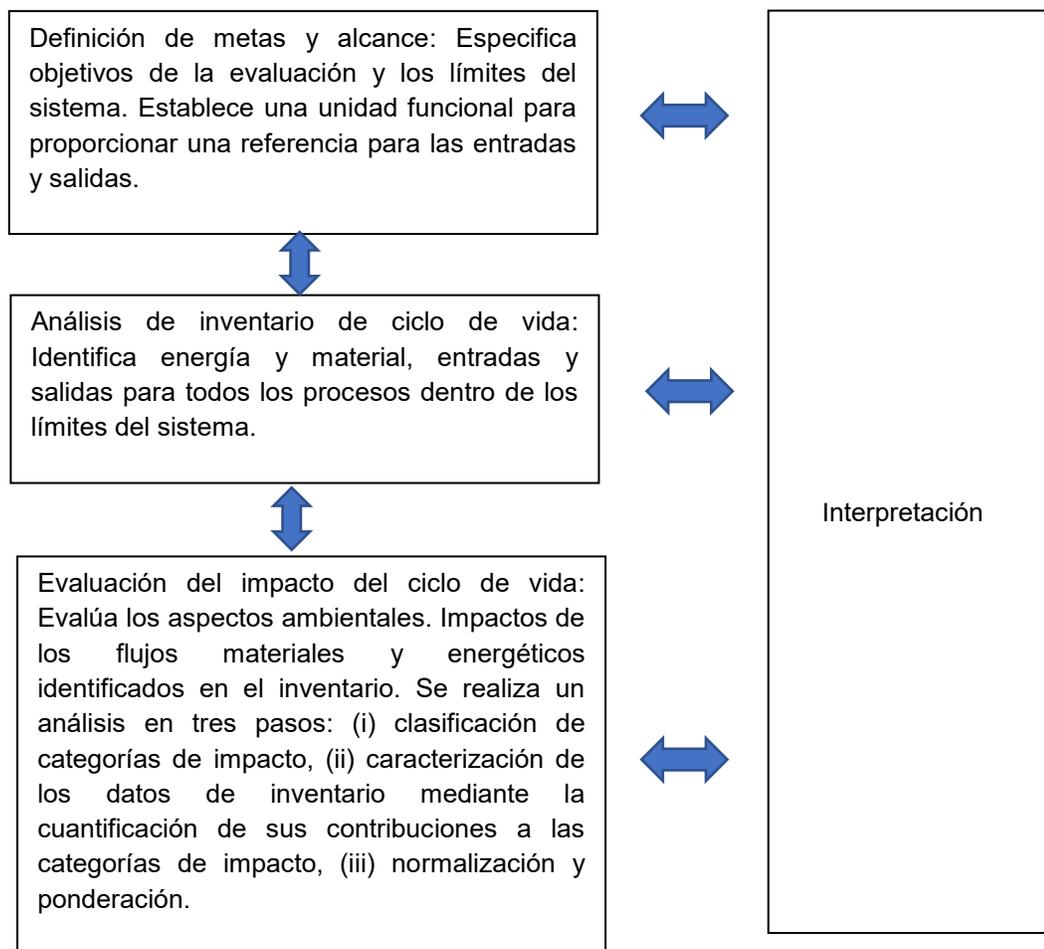


Ilustración 5. Etapas de un análisis de ciclo de vida de acuerdo a (ISO, 1997) Fuente: Elaboración propia

4. 3. 1 Objetivo y alcance del estudio

En esta fase se define el tema de estudio y se incluyen los motivos que llevan a realizarlo. También en esta fase se establece la unidad funcional. La unidad funcional describe la función principal del sistema analizado. Un ACV no sirve para comparar productos entre sí, sino servicios y/o cantidades de producto que lleven a cabo la misma función (Baumann et al., 2004).

Debido a su naturaleza global un ACV completo puede resultar de grandes dimensiones por esta razón se deberán establecer unos límites que deberán quedar perfectamente identificados. Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del ACV. Varios factores determinan los límites del sistema, incluyendo la aplicación prevista del estudio, las hipótesis planteadas, los criterios de exclusión, los datos y limitaciones económicas y el destinatario previsto.

4. 3. 2. Análisis de Inventario (ICV)

Esta fase comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar todos los efectos ambientales adversos asociados a la unidad funcional. La carga ambiental se define como la salida o entrada de materia o energía de un sistema causando un efecto ambiental negativo. Con esta definición se incluyen tanto las emisiones de gases contaminantes, como los efluentes de aguas, residuos sólidos, consumo de recursos naturales, ruidos, radiaciones, olores, etc. En esta fase se procederá a asignar los flujos de materia y energía así como las emisiones al medio ambiente asociadas a cada producto o subproducto (Baumann et al., 2004).

4. 3. 3. Análisis del Impacto (AICV)

La estructura de esta fase viene determinada por la normativa ISO 14042, distinguiendo entre elementos obligatorios y elementos opcionales.

Los elementos considerados obligatorios son (ISO, 2000):

1. Selección de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos.
2. Clasificación: En esta fase se asignan los datos procedentes del inventario a cada categoría de impacto De acuerdo a el tipo de efecto ambiental esperado. Una categoría de impacto es una clase que representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de productos.
3. Caracterización. Consiste en la modelización, mediante los factores de caracterización, de los datos del inventario para cada una de dichas categorías de impacto. La suma de diferentes intervenciones ambientales para una misma categoría se hará en la unidad del indicador de la categoría. Mediante los factores de caracterización, también llamados factores equivalentes, las diferentes intervenciones ambientales, emisión de gases, por ejemplo, se convierten a unidades del indicador. Es necesario el uso de modelos para obtener estos factores de caracterización. La aplicabilidad de los factores de caracterización dependerá de la precisión, validez y características de los modelos utilizados.

4. 3. 4. Interpretación de resultados

La interpretación es la fase de un ACV en la que se combinan los resultados de análisis del inventario con la evaluación de impacto. Los resultados de esta

interpretación pueden adquirir la forma de conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones. Permite determinar en qué fase del ciclo de vida del producto se generan las principales cargas ambientales y por tanto que puntos del sistema evaluado pueden o deben mejorarse. En los casos de comparación de distintos productos se podrá determinar cuál presenta un mejor comportamiento ambiental (Baumann et al. 2004).

También existen una serie de elementos opcionales que pueden ser utilizados dependiendo del objetivo y alcance del estudio de ACV:

1. Normalización: Se entiende por normalización la relación de la magnitud cuantificada para una categoría de impacto respecto un valor de referencia ya sea a escala geográfica y/o temporal.
2. Agrupación: Clasificación y posible catalogación de los indicadores
3. Ponderación: Consiste en establecer unos factores que otorgan una importancia relativa a las distintas categorías de impacto para después sumarlas y obtener un resultado ponderado en forma de un único índice ambiental global del sistema.
4. Análisis de calidad de los datos: ayudará a entender la fiabilidad de los resultados del AICV. Se considerará obligatorio en análisis comparativos.

4. 4 Softwares de análisis de ciclo de vida

En los últimos años y basados en la metodología del ACV se han desarrollado numerosos programas para facilitar su cálculo. La mayoría de estos programas incluyen bases de datos que pueden variar en extensión y calidad de dichos datos y por lo tanto en el precio. Las bases de datos de inventarios públicos vienen incorporadas en la mayoría de los programas comerciales.

En ellos se introducen los datos que configuran el inventario para posteriormente realizar los cálculos propios de la fase del AICV, obteniéndose los resultados para las diferentes categorías de impacto elegidas. Algunos de estos programas

realizan también análisis de sensibilidad e incertidumbre. En la siguiente tabla se ejemplifican algunos de los softwares presentes en el mercado. En la presente investigación se utiliza GaBi como herramienta para realizar en análisis de ciclo de vida de la planta de producción geotérmica.

A continuación, se ofrece una lista de los softwares más importantes que se encuentran en el mercado y sus principales características:

- ✓ SimaPro: Esta especializado en la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida. Presenta demos para poder iniciarse, guías de soporte, a la vez que completas y variadas bases de datos. Compara y analiza complejos productos descomponiéndolos en todos sus materiales y procesos.
- ✓ Eco-it: Herramienta especializada en software simplificado de análisis de ciclo de vida (ACV) y Huella de Carbono (HC) para productos. Especialmente indicado para diseñadores de productos y envases. Su manejo es sencillo.
- ✓ Air. e LCA: Permite incluir tanto ACV como Huella de Carbono. Se puede enfocar tanto en productos como organizaciones. Es una potente interfaz gráfica para el diseño de ciclos de vida y mapa de procesos. Permite generar informes de verificación y gráficos automáticamente.
- ✓ Open LCA: Es un software libre, gratuito y multiplataforma para realizar completos análisis de ciclo de vida. Una herramienta que se lleva desarrollando desde 2006, y al ser libre puedes modificar las características para adaptarlo a tus necesidades. Está orientado al ACV, pero también se puede realizar la huella de carbono y del agua. Dispone de una amplia gama de bases de datos.
- ✓ Gabi: Es una herramienta para el ACV y contiene todos los elementos necesarios para modelar productos y sistemas. Se pueden construir modelos para cualquier producto, balances de entrada y salida de emisiones, materiales y energía y modificar los parámetros en cualquier

momento. Posibilita escenarios de fin de vida. Permite la exportación de los datos.

- ✓ TEAM: Herramienta muy completa, flexible y potente pero algo difícil de utilizar. Permite introducir información relativa a los costes, diagrama de flujos, procesos etc. La introducción de datos es similar a GaBi. Posibilita en cualquier momento modificar los parámetros del ciclo de vida del producto. Posibilita el análisis de fin de vida y exportar la información.
- ✓ UMBERTO: Ofrece datos de gran calidad y resultados transparentes. Refleja el ciclo de vida completo, entradas y salidas, flujos entre procesos, etc. Tiene alta flexibilidad respecto a los límites del sistema. Posibilita también estudiar el ciclo de vida de coste económico. Se puede exportar la información.

Las bases de datos de inventario incluidas en el software son Ecoinvent, GaBi y U. S. LCI, entre las más conocidas. En el presente estudio consideraremos la información que se encuentra en la base de datos Ecoinvent, en donde se encuentran una gran variedad de procesos y datos de toda clase de producto y sistema.

4. 5 Base de datos Ecoinvent

La base de datos Ecoinvent ha sido desarrollada por el Centro de inventario de ciclo de vida suizo (Ecoinvent, 2018). Para la misma han combinado diferentes bases de datos de inventario, con esta combinación pretenden unificar y crear una base de datos de alta calidad enfocada en investigaciones para las condiciones de Suiza y Europa occidental. La base de datos contiene información de 4100 productos y procesos que van desde energía, transporte, materiales de construcción, químicos, pulpa de papel, tratamiento de residuos y el sector agrícola.

4. 6 Metodología para la evaluación de impacto CML

Los métodos con los que la plataforma cuenta para realizar la evaluación de impactos son TRACI, CML, en el estudio utilizaremos la metodología CML porque al tener un carácter global La metodología de CML elaborada por el Instituto de Ciencias medioambientales de la Universidad de Leiden en los Países Bajos, es la metodología más utilizada y que suele considerarse más completa. Para derivar los factores de impacto utiliza fundamentalmente datos europeos. Agrupa los resultados de LCI en categorías de punto medio por temáticas, que son mecanismos comunes (como el cambio climático) o grupos (como la toxicidad ecológica) (Frischknecht et al., 2007).

El método de análisis de impacto implementado en la base de datos Ecoinvent con la metodología CML está definido con una configuración de categoría de impacto orientada a la aproximación del problema, La manera en que funciona la metodología es vinculando los flujos de elementos del Ecoinvent con los las sustancias de los factores de caracterización. Las categorías de impacto analizadas De acuerdo a la metodología CML 2001 son:

1. Acidificación: Las sustancias acidificantes causan un gran impacto en el suelo, las aguas subterráneas y superficiales, en organismos y en los materiales. Los factores de Acidificación Potencial (AP) se expresan como kg de SO₂ equivalente/ kg de emisión.
2. Agotamiento de ozono estratosférico: Debido al agotamiento del ozono estratosférico, una gran parte de las radiaciones UV alcanzan la superficie de la tierra. Esto puede provocar efectos perjudiciales en la salud humana, la de los animales, en los ecosistemas acuáticos y terrestres, en los ciclos bioquímicos y en los materiales. El modelo de caracterización define esta categoría en Agotamiento Potencial del Ozono (ODP) para distintos gases como kg CFC-11 equivalente/ kg de emisión.

3. Cambio climático: El cambio climático está relacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero. El modelo de caracterización es desarrollado a través del factor de caracterización, que son expresados como Potencial de Cambio Climático para un horizonte de 100 años (GWP100) en kg de CO₂/ kg de emisión.
4. Ecotoxicidad acuática de agua dulce: Hace referencia al impacto en el agua de los ecosistemas como resultado de las emisiones de sustancia tóxicas al aire, agua y al suelo. La Ecotoxicidad Potencial (FAETP) describe el destino, exposición y efectos de las sustancias tóxicas y se expresa en equivalentes de 1, 4-diclorobenceno/ kg de emisión.
5. Ecotoxicidad marina: Esta categoría es igual que la anterior pero referida al agua de mar.
6. Ecotoxicidad terrestre: Igual que los dos anteriores pero referida al suelo.
7. Eutrofización: El potencial de nutrificación (EP) designa el aumento de nutrientes en los sistemas acuáticos y se expresa como kg de fosfato equivalente/ kg de emisión.
8. Formación de ozono fotoquímico: La formación de ozono fotoquímico es la formación de sustancias reactivas las cuales son perjudiciales para la salud humana, para los ecosistemas y que pueden dañar a los cultivos. La Creación Potencial de Ozono Fotoquímico (POCP) se expresa en kg de etileno equivalente/ kg de emisión.
9. Toxicidad humana: Esta categoría se refiere a los efectos de las sustancias tóxicas en el entorno de los seres humanos, sin incluir los riesgos de exposición en el trabajo. Los factores de caracterización de esta categoría describen el destino, exposición y efectos de las sustancias tóxicas para un horizonte de tiempo infinito. Para cada sustancia tóxica los factores de Toxicidad Potencial Humana (HTP) son expresados como equivalentes de 1, 4-diclorobenceno/ kg de emisión.

4. 7 Limitaciones del Análisis de Ciclo de Vida

A pesar de haber demostrado su validez a la hora de determinar los impactos ambientales de un producto esta metodología presenta varias desventajas, una considerable parte de la información y base de datos se encuentran limitadas, algunas incluso son de calidad dudosa y su relevancia varía en dependencia de la región. Para realizar un inventario de ciclo de vida se puede escoger la base de datos en dependencia del estudio que se está realizando, sin embargo el uso de software en ocasiones requiere del uso de dos o más bases de datos que no necesariamente están al alcance de los analistas (CONACYT, 2016). Muchos análisis requieren de información que no está disponible, no existe en la región que se desea estudiar o simplemente es muy costosa por lo que muchos estudios de ciclo de vida no pasan de la fase de inventario (Baumann et al. 2004).

La subjetividad de las elecciones e hipótesis que se hacen en un análisis de ciclo de vida, los modelos están limitados por la hipótesis, las condiciones locales pueden no estar adecuadamente representadas por las condiciones globales y regionales, la ausencia de dimensiones espaciales y temporales en los datos del inventario y los modelos de categorías de impacto se encuentran en diferentes etapas de desarrollo (Molin & Laurent, 2014).

4. 8 Estudios de análisis de ciclo de vida en México

México cuenta con muy pocos estudios de análisis de ciclo de vida, para el caso específico de la energía geotérmica podemos citar los estudios realizados por (Güereca et al., 2015) mostrando los avances en ese aspecto ya que inicialmente se enfocó el análisis de ciclo de vida al manejo de desechos (Santoyo-Castelazo & Azapagic, 2014) realiza un análisis de ciclo de vida de la generación eléctrica en México, mientras que (Tomasini-Montenegro et al. 2017) efectúa una compilación de las tecnologías de conversión de energía: vapor seco, ciclo binario, flash único y flash doble, incluidos los proyectos piloto de generación de sistemas

geotérmicos mejorados. Estos trabajos proponen un análisis más profundo de los impactos ambientales del ciclo de vida para promover una gestión ambiental sostenible de la generación de energía geotérmica, lo que aún representa un desafío para este sector industrial. El estudio realizado sobre la sustentabilidad de pozos geotérmicos realizado por (Rojas Hernández, 2016) hace un análisis detallado del ciclo de vida de un pozo geotérmico, mientras que el estudio que se propone a continuación desarrollará el análisis de ciclo de vida de una central geotermoeléctrica.

5. Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de una planta de generación geotérmica instalada para la generación eléctrica en México

En los capítulos anteriores se describieron las características más importantes de la energía geotérmica, su importancia en la generación eléctrica de México y se hizo hincapié en la necesidad de realizar estudios de ciclo de vida para este tipo de tecnologías debido a la carencia de esta clase de análisis en la industria energética mexicana y la necesidad de establecer comparaciones con otras tecnologías de generación eléctrica.

En el caso específico de México, el panorama actual busca aumentar la capacidad instalada y la generación de electricidad a partir de fuentes renovables de energía e impulsar el desarrollo tecnológico, de talento y de cadenas de valor en energías renovables (SENER, 2017a), debido al agotamiento de los recursos petroleros y los compromisos adquiridos por México en materia ambiental, por lo tanto urgen estudios similares a este que proporcionen herramientas a los tomadores de decisiones.

En el transcurso de la investigación se consultaron diversas fuentes bibliográficas en la búsqueda de un conjunto de datos que permitieran generar un inventario de ciclo de vida lo más cercano posible al caso de estudio, debido a la carencia de fuentes de datos reales respecto a centrales geotérmicas de flasheo simple en territorio mexicano. En el capítulo anterior se describieron las fases que conforman la metodología de ACV conforme a la norma ISO 14040: 2007. A continuación, se describen estas fases de acuerdo con el presente estudio.

5. 1 Objetivo de estudio

El objetivo principal de este estudio es aplicar la metodología de análisis del ciclo de vida para evaluar los impactos ambientales potenciales del ciclo de vida de una

planta de producción geotermoeléctrica de flasheo simple ubicada en México y , conectada a la red eléctrica.

La planta tiene una capacidad instalada de 25MW con un ciclo de una sola evaporación. Las razones por las que se lleva a cabo este estudio aparecen detalladas en el marco teórico de esta investigación (ver capítulos dos y tres), con los datos y resultados del presente estudio se espera aportar argumentos suficientes para la toma de decisiones sobre proyectos energéticos de este corte en México.

EL estudio hará un análisis de los impactos ambientales potenciales así como de los beneficios que tiene la producción de energía eléctrica con base en la energía geotérmica, comparándola además con diferentes tecnologías de generación (combustibles fósiles y otras renovables).

La estructura del análisis utilizado en la investigación es similar a la que podría utilizarse para estudios de este mismo corte, modificándola sin perjudicar los resultados del presente estudio.

Se realizó una búsqueda exhaustiva en la literatura actualizada con vistas a generar el inventario de ciclo de vida del sistema, las muestras de datos utilizados con respecto a las emisiones de este estudio son de carácter estrictamente confidencial y no se harán públicas sus fuentes, sin embargo, se mencionan los datos más importantes para la realización de este estudio en forma de medidas de tendencia central. Fue necesario el uso de datos adicionales para la realización del análisis del inventario. En la presente investigación, estos datos se han tomado de la base de datos de Ecoinvent, la más actualizada y completa para la realización de ACV (Frischknecht et al., 2007).

5. 2 Alcance

El alcance de la investigación se adaptó de acuerdo a la información recopilada. En el presente estudio se consideran los límites del sistema desde “la cuna hasta

la tumba ", de una planta de generación geotermoeléctrica en México, no se considera el reciclaje de la planta.

5. 3 Unidad Funcional

El análisis se basa en la unidad funcional 1kwh de electricidad generada por una unidad geotermoeléctrica de flasheo simple, los impactos ambientales potenciales por 1 kWh también se han calculado, para permitir la comparación con otras tecnologías de generación de electricidad.

5. 4 Vida útil

La vida útil del sistema se considera de 30 años. Esta cifra aparece reportada en la literatura, aunque cabe mencionar que en México existen unidades de producción geotermoeléctrica con más de 40 años de explotación.

5. 5 Límites del sistema

El sistema analizado en el presente estudio se ha definido considerando tres etapas del ciclo de vida: construcción, mantenimiento y operación, quedando la red eléctrica fuera de los límites del sistema. Para una mejor comprensión se realizó un análisis en primer y segundo plano, de modo que los materiales y combustibles utilizados en el proceso de construcción de la planta fuesen analizados detalladamente por su alto impacto ambiental. Se mencionó que el alcance del estudio es "de la cuna a la tumba", se considera la tumba la salida de la electricidad hacia la red eléctrica nacional, el reciclaje de los elementos no se considera debido a que en estudios anteriores no se encuentra información relacionada debido a que existen muy pocas plantas de este tipo que hayan llegado a esta fase.

El estudio se centra en la producción de electricidad por tal motivo no se considera la transmisión, distribución y consumo de la energía.

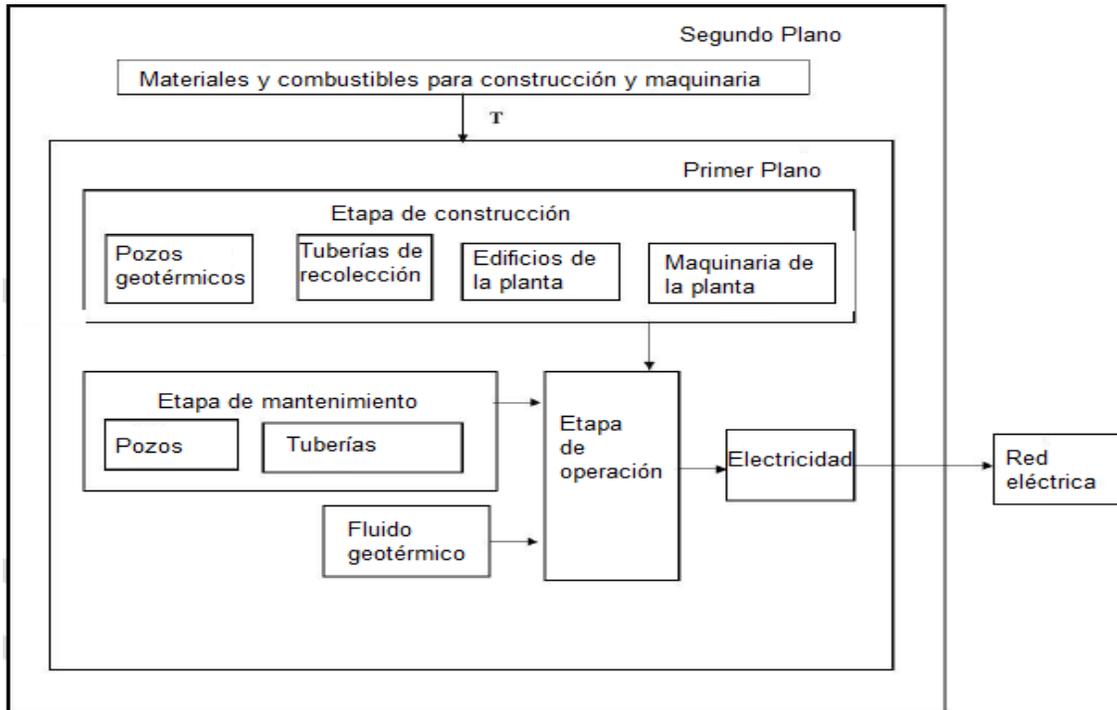


Ilustración 6. Sistema y límites del sistema basado en (Karlsdóttir et al., 2015)

5. 6 Hipótesis y limitaciones

La hipótesis que se plantea para la realización del estudio es que es posible mediante el análisis de ciclo de vida de una central geotermoeléctrica calcular sus impactos ambientales potenciales basados en la gran cantidad de información existente en la literatura al respecto.

El estudio tiene varias limitaciones siendo las más importante la carencia de datos específicos sobre plantas de este tipo, por la que la variabilidad de información de una región a otra influye en la certeza de los resultados finales. En el presente estudio se analiza una planta de producción geotermoeléctrica con una capacidad

instalada de 25 MW ubicada en México, con características similares a una unidad de 25 MW ubicada en Cerro Prieto IV, con características diferentes a las encontradas en la base de datos de Ecoinvent y en la revisión bibliográfica realizada a partir de las investigaciones realizadas por (Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010), (Karlsdóttir et al., 2015), (Tomasini-Montenegro et al., 2017) y (Yu, 2017)). Los resultados obtenidos servirán de base para la aplicación de análisis de tecnologías energéticas similares con el objetivo de conocer sus impactos ambientales potenciales.

La base de datos Ecoinvent 3. 1 contiene valores desactualizados que siguen siendo parte de los valores considerados, aunque para utilizar la base de datos Ecoinvent 3. 1 a las características del modelo se hicieron las modificaciones que se consideraron pertinentes con la información existente en la literatura. Los principales aspectos relativos a la calidad de los datos y la representatividad. se evalúan en la Tabla 2, mostrando la tecnología evaluada, la antigüedad de los datos, su alcance geográfico y su robustez. Esta evaluación se presenta para que se obtengan una visión general del origen de los datos.

5. 7 Consideraciones

- ✓ La etapa de fin de vida está fuera del alcance, ya que es específica del sitio. Además, las pérdidas de transmisión y las posteriores entregas de la energía tampoco se consideran como se explicó anteriormente (Karlsdóttir et al., 2015).
- ✓ Se excluyeron materiales que se consideraron no significativos para el estudio; materiales como computadoras, ventanas, puertas, pernos, tornillos, madera, pintura, etc. (Yu, 2017).
- ✓ Se asume una vida útil de 30 años para la planta de generación geotermoeléctrica (Castelar et al., 2011).
- ✓ No se considera el reciclaje debido a que no se cuenta con información al respecto en la literatura actualizada (Yu, 2017).

- ✓ De acuerdo a (Karlisdóttir et al., 2015) el hipoclorito de sodio se agrega al circuito de enfriamiento durante las actividades de mantenimiento. Sin embargo, no se incluyen los productos químicos para el circuito de refrigeración en el sistema analizado. Por esta razón, la información sobre el hipoclorito de sodio no se ha considerado como parte del inventario del ciclo de vida

5. 8 Análisis y tratamiento de datos.

Para la realización del estudio existían datos de emisiones de forma desordenada que no se ajustaban a las características esperadas ya que era evidente que existían errores en las mediciones se les aplicó un conjunto de pruebas estadísticas de modo que los datos se fueran acercando a una distribución normal, Los modelos descritos en este documento se crearon utilizando GeNIe Modeler, disponible de forma gratuita para investigación académica y uso docente de BayesFusion, LLC, <http://www.bayesfusion.com/>. se procedió a muestrear las variables de influencia y la transformación de sus realizaciones en una medición, es justamente el proceso de propagación de distribuciones que mapea las variables de influencia en una estimación del mensurando bajo medición lo que se conoce como método de Montecarlo, de este modo obtuvimos un valor lo más cercano posible al valor real, este método se siguió para las emisiones de la etapa de operación y para la profundidad de los pozos en la etapa de construcción.

En la figura siguiente se muestran las gráficas de tendencia central que permitieron establecer valores para las emisiones provenientes de la fase de operación de la planta. Un proceso similar se siguió para determinar la profundidad de los pozos geotérmicos.

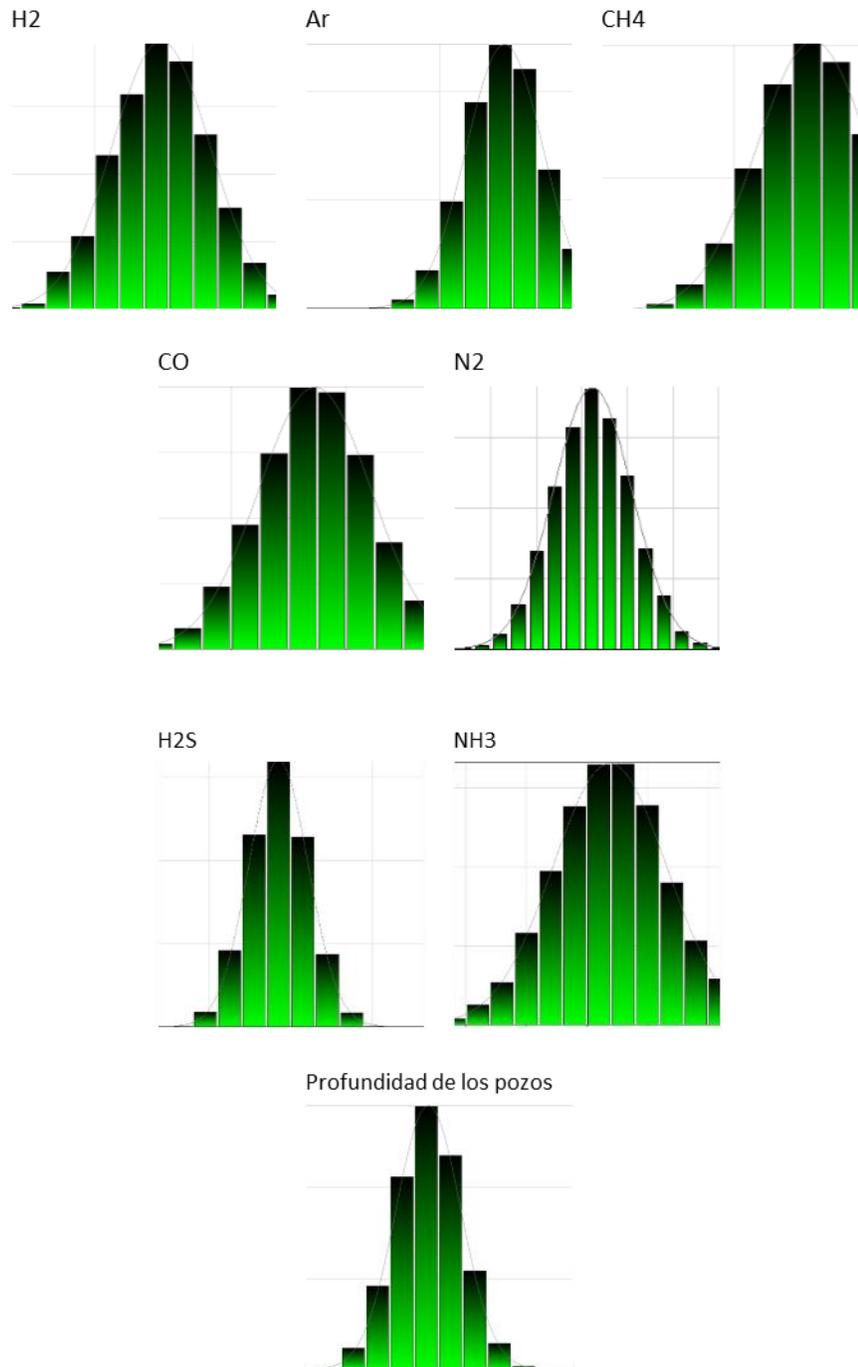


Ilustración 7. Emisiones normalizadas de la etapa de operación

Los datos obtenidos para la mediana de las distribuciones se presentan en la tabla siguiente, para su uso en el análisis de ciclo de vida se sometieron a

transformaciones con el fin de llevarlos a las unidades requeridas para el uso de la herramienta GaBi 6.

Tabla 1. Mediana de las emisiones en la etapa de operación.

H ₂	67. 71055	mg de contaminante/kg de salmuera
Ar	2. 67923	mg de contaminante/kg de salmuera
N ₂	123. 279	mg de contaminante/kg de salmuera
CH ₄	273. 06	mg de contaminante/kg de salmuera
CO ₂	7401. 58	mg de contaminante/kg de salmuera
H ₂ S	424. 637	mg de contaminante/kg de salmuera
NH ₃	33. 9098	mg de contaminante/kg de salmuera

En el caso específico de la profundidad promedio de los pozos el dato obtenido fue de 2957. 71 metros, mismo que se aplicó tal cuál al estudio.

Para calcular la generación bruta anual por MWh se realizó un análisis de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para plantas con características similares, el dato obtenido aparece en el análisis de inventario detallado en el epígrafe siguiente.

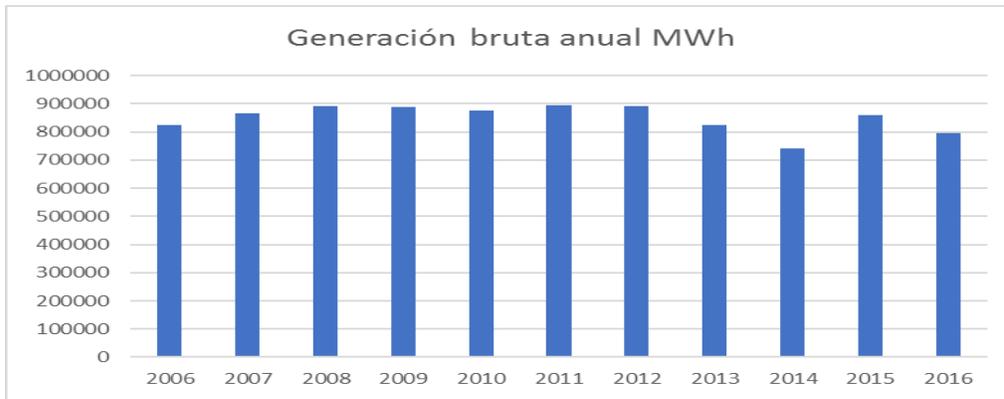


Ilustración 8. Datos de generación anual en MWh De acuerdo a INEGI (INEGI, 2017)

5. 9 Descripción del análisis de inventario

En el caso del análisis de inventario se realizó una búsqueda extensa en la bibliografía y se adaptaron los datos al caso de estudio. Como se muestra en la tabla 2, estas variables incluyen el número de pozos perforados (que se usan para estimar el total de medidores perforados), las tuberías de recolección y la capacidad instalada que se utilizan para parametrizar la información sobre el material, la maquinaria y los requisitos de trabajo para la construcción de los pozos. oleoductos, planta de energía de edificio

Además de estos requisitos mínimos, la información sobre el fluido geotérmico, la operación y el mantenimiento también se han definido como específicos del sitio. Por lo tanto, en base a la información de disponibilidad de datos para el inventario de ciclo de vida correspondiente al sistema de primer plano, se ha obtenido de la información de libre acceso. Los datos para el sistema en segundo plano se han obtenido de la base de datos Ecoinvent 3. 1.

Tabla 2. Datos específicos del sitio recopilados para la normalización del inventario para las etapas de construcción y operación.

Concepto	Parámetro	Valor	Referencia
Depósito	Número de pozos perforado	8 (7 pozos productores) 1 pozos de reinyección)	(Di Pippo & DiPippo, 2012)
Depósito	Total de metros perforados	11828m	(Di Pippo & DiPippo, 2012)
Depósito	Tuberías	6239, 58m (5034. 72 tuberías que transportan vapor)1204, 86m tuberías que transportan salmuera	(Di Pippo & DiPippo, 2012)
Depósito	Capacidad instalada	25 MW	(Di Pippo & DiPippo, 2012)

Para el caso específico de las emisiones se utilizaron 8 pozos, y como valor de emisión por pozo se utilizó el valor de la mediana por ser el que mejor se ajusta a

la distribución y el valor de flujo correspondiente al 41% del flujo total De acuerdo a lo reportado en la literatura.

Tabla 3. Emisiones consideradas para la parametrización del inventario de las etapas de operación.

Contaminantes	Unidades	Entrada/Salida	valor
H ₂ del fluido geotérmico	kg/kWh	salida	0.00359104
Ar del fluido geotérmico	kg/kWh	salida	0.00026042
N ₂ del fluido geotérmico	kg/kWh	salida	0.01069592
CH ₄ del fluido geotérmico	kg/kWh	salida	0.0239626
CO ₂ del fluido geotérmico	kg/kwh	salida	0.57704716
H ₂ S del fluido geotérmico	kg/kwh	salida	0.03556233
NH ₃ del fluido geotérmico	kg/kwh	salida	0.00964181

Basado en las fuentes de datos específicas de plantas geotermoeléctricas con características similares a la del caso de estudio consultadas para la parametrización e inventario de las etapas de operación y mantenimiento se

realizaron cambios en todos los valores teniendo en consideración que se estaba realizando el análisis de ciclo de vida de una planta de generación de 25 MW de capacidad instalada (se hicieron cambios en todos los casos excepto en las fracciones de vapor y salmuera).

Tabla 4. Flujos estimados para la etapa de operación.

Número de pozos	Productores: 8	(Barragán-reyes, Arellano-gómez, & Portugal-marín, 2018)
Capacidad	25 MW	(Ocampo-díaz, 2005)
Cantidad de vapor por unidad de 25MW	183 t/h de vapor	(Ocampo-Díaz, 2005)
Toneladas de vapor/MWH	7. 3	Ocampo-Díaz, 2005)
Caudal de vapor de alta presión (tons/h)	969. 79	(Ocampo-Díaz, 2005)
Caudal de vapor de baja presión (tons/h)	79. 83	(Ocampo-Díaz, 2005)
Fracción de vapor	41%	(Gutiérrez-Negrín, 2015)
Fracción de salmuera	59%	(Gutiérrez-Negrín, 2015)

Factor de capacidad	84, 5%	(Gutiérrez-Negrín, 2015)
Tasa de producción por pozo	25. 5 t/h	(Gutiérrez-Negrín, 2015)
Consumo bruto de vapor específico	8. 9 tons per MWh	(Gutiérrez-Negrín, 2015)
Producción anual	212670. 3889 MWh al año	A partir del consumo bruto de vapor específico y de la producción anual de vapor
Descripción de las tuberías	<ul style="list-style-type: none"> • Diámetros entre 8 "y 46" • Aisladas con una capa de 2 "de lana mineral o fibra de vidrio. • Cubierta externa de aluminio o galvanizado hierro. 	(Castelar et al., 2011)
Fluido másico	135. 75Kg/s	Asumiendo 25. 5 ton/h, una capacidad instalada de 25 MW y un factor de capacidad de 84. 5%
Vida útil	30	(Barragán-reyes et al., 2018)

Producción de vapor en kg/año	193601741	A partir del valor correspondiente al 41% del fluido másico
-------------------------------	-----------	---

Para calcular los flujos estimados en las etapas de construcción y mantenimiento presentados por kWh. Para el cálculo de estos flujos se utilizaron datos adaptados a partir de estudios realizados por (Yu, 2017) y se consideró una producción anual de esta planta de 2126703889 kWh anuales reportados por (Gutiérrez-Negrín, 2015) para calcular el factor de escala y un número de 8 pozos.

$$fr = VPfe$$

V: se define como masa, energía o longitud del pozo en dependencia de los requerimientos

P: se define como el número de pozos

$$fe = \frac{1}{\text{produccion anual en Kwh}}$$

Ecuación 1. Factor de escala

De acuerdo a (Karlsdóttir et al., 2015) una vez que se recopilan los datos presentados en la Tabla 1, se normaliza la información correspondiente al material, la energía, los trabajos de construcción y el uso de maquinaria durante las etapas de construcción y mantenimiento.

Tabla 5. Flujos estimados de las etapas de construcción y mantenimiento presentados por kWh.

Maquinaria de la planta de energía			
aluminio	entrada	0. 801279079	kg/KWh
cobre	entrada	1. 201918618	kg/KWh
lana mineral	entrada	0. 814523361	kg/KWh
acero mineral	entrada	7. 757838351	kg/KWh
acero	entrada	28. 52818405	kg/KWh
titanio	entrada	1. 731689909	kg/KWh
Edificios de la planta de energía			
aluminio	entrada	1. 913798791	kg/KWh
cobre	entrada	0. 503282727	kg/KWh
lana mineral	entrada	1. 877377015	kg/KWh
acero	entrada	39. 54411585	kg/KWh
Asfalto	entrada	104. 7092958	kg/KWh

cemento	entrada	0. 284752069	kg/KWh
---------	---------	-----------------	--------

5. 10 Evaluación de impactos ambientales

La etapa de evaluación de impactos ambientales es la encargada de asociar los datos obtenidos del inventario con las categorías de impacto seleccionadas, indicadores de categoría y modelos de caracterización. Los datos resultantes del inventario se asignan a cada categoría de clasificación De acuerdo a el impacto ambiental esperado.

El método seleccionado para realizar la evaluación de impactos ambientales fue el CML 2001. Las categorías de impacto seleccionadas para el análisis de resultados se encuentran en la metodología CML 2001 (ver capítulo 4).

1. Agotamiento de los recursos abióticos
2. Cambio climático
3. Destrucción de la capa de ozono
4. Toxicidad humana
5. Ecotoxicidad humana
6. Smog fotoquímico
7. Acidificación
8. Eutrofización
9. Uso de recursos

En el siguiente capítulo se discuten los resultados obtenidos en el ACV de la planta de generación geotermoeléctrica a partir de la información presentada hasta el momento.

6. Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación de los impactos ambientales del ciclo de vida (EICV) obtenidos en el estudio. Los resultados están referenciados a la unidad funcional de 1kwh.

La obtención de resultados se dividió en dos secciones: en la primera sección se tienen los resultados obtenidos para cada una de las categorías de impacto del Caso Base (CB), después se comparará el CB con los casos de referencia (CR) utilizando la categoría de impacto del potencial de calentamiento global GWP.

Los resultados del análisis de sensibilidad se presentan en la segunda sección, se están considerando dos análisis de sensibilidad tomando como categoría de impacto al cambio climático. En el caso A se realizó una mezcla del Diesel utilizado en la construcción del pozo geotérmico con 10% de etanol, este dato es muy importante ya que la utilización de Diesel ha demostrado gran impacto en la ecotoxicidad. En el caso B se hizo una disminución de las emisiones de la fase de operación.

6. 1 Caso Base

La planta geotermoeléctrica tiene un tiempo de vida de 30 años, la tabla 6 contiene los resultados del inventario de ciclo de vida (ICV) para cada una de las categorías de impacto utilizando la metodología del CML 2001 para el Caso Base. En la tabla 6 se muestran los componentes que conforman la planta geotermoeléctrica con sus valores absolutos y porcentajes de aportación en cada una de las categorías de impacto. En total se están considerando 11 categorías de impacto para la discusión de los resultados. Al momento de interpretar los resultados se tratará de especificar la procedencia del impacto asociado.

La Tabla muestra que la etapa de operación es la de mayor aportación de impactos para las diferentes categorías de impacto. En esta tabla se exponen los resultados obtenidos en el Caso Base.

Tabla 6. Impactos Ambientales potenciales de las etapas del Caso Base, valores porcentuales. Fuente: Elaboración propia con resultados del ACV

Impactos ambientales potenciales	Etapa de mantenimiento	Etapa de construcción	Etapa de operación
ADP elements(kg Sb eq/KWh)	0.16	0.22	0.00
ADP fossil(Mj Sb eq/KWh)	3.01	2.35	0.00
AP(kg SO2 eq/KWh)	2.89	2.24	38.19
EP(kg Phosphate eq/KWh)	1.18	0.92	3.53
FAETP(kg DCB eq/KWh)	1.79	1.70	0.00
GWP(kg CO2 eq/KWh)	2.65	2.08	44.20
HTP(kg DCB eq/KWh)	5.68	5.35	5.65
MAETP(kg DCB eq/KWh)	79.80	82.92	0.00
ODP(kg R11 eq/KWh)	0.05	0.04	0.00
POCP(kg Ethene eq/KWh)	2.66	2.07	8.42
TETP(kg DCB eq/KWh)	0.11	0.10	0.00

En la figura 6. 2 están representados los resultados porcentuales en una gráfica de contribución de los componentes de la planta geotérmica al total de impactos ambientales potenciales del Caso Base, en cada una de las categorías de impacto se observa el porcentaje de aportación de cada una de las fases de la planta geotérmica (mantenimiento, construcción y operación).

Contribución de las fases de la planta geotérmica al total de los impactos potenciales Unidad funcional(UF) 1 kWh

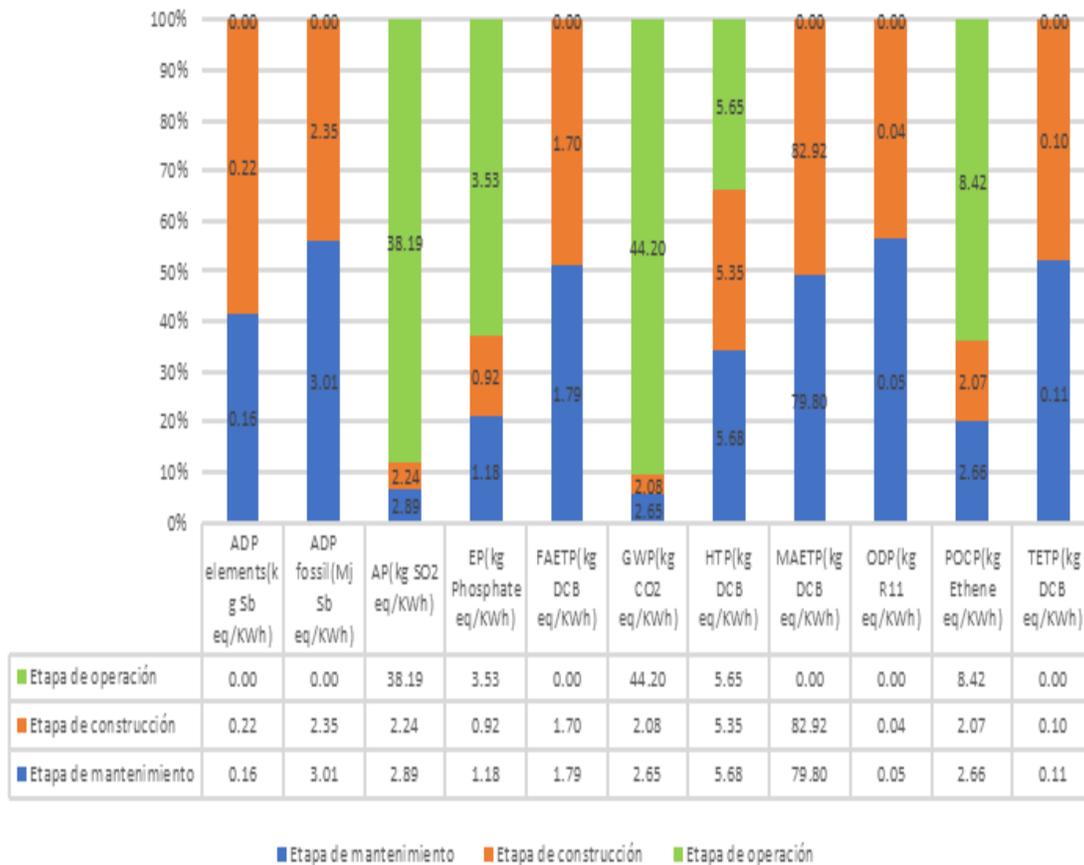


Ilustración 9. Resultados del ACV obtenidos para cada una de las categorías de impacto de la planta geotermoeléctrica para el Caso Base. Fuente: Propia con resultados del ACV. ADP: Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos; AP: Potencial de Acidificación; EP: Potencial de Eutrofización; FAETP: Potencial de Ecotoxicidad Acuática de agua dulce; GWP: Potencial de Calentamiento Global; HTP: Potencial de Toxicidad Humana; MAETP: Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina; ODP: Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono; POCP: Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico; TETP: Potencial de Ecotoxicidad Terrestre.

La fase de operación tiene la mayor contribución en el potencial de calentamiento global GWP (44. 2 %) y a la acidificación potencial del sistema (38. 19 %)esta fase

también contribuye en menor medida a la creación de ozono fotoquímico con 8.42%, mientras que la contribución, de las etapas de mantenimiento y de operación es mayor para el potencial de ecotoxicidad marina fundamentalmente con impactos de 79.8% y 82.92% respectivamente.; este impacto se debe fundamentalmente al Diesel utilizado en la construcción y mantenimiento de los pozos, y a la profundidad de los mismos.

6.2 Interpretación del Caso Base

En la interpretación de resultados de la Norma ISO 14040: 2006 menciona que es la fase donde los resultados del inventario y de la evaluación de impactos se consideran juntos. por lo cual a continuación se dará la interpretación de los resultados.

6.2.1 Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP elements)

El potencial de agotamiento de recursos abióticos de elementos a lo largo de todo el ciclo de vida del sistema es $1.81E-04$ [Kg Sb-eq.] ver detalles en la tabla 6, la fase que afecta en mayor medida al ADP es la construcción de la planta geotérmica, su contribución está dada por el agotamiento de recursos minerales como lo son el aluminio utilizado en la construcción de los edificios de la planta, etc. La segunda fase que contribuye es la fase de mantenimiento, mientras que la etapa de operación tiene una contribución mínima en este impacto potencial.

6.2.2 Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos Fósiles (ADP fossil)

En el potencial de agotamiento de recursos abióticos fósiles se consideran el consumo de recursos fósiles como son el petróleo, gas y carbón. Las principales contribuciones se deben a la utilización de recursos para la generación de energía. El componente que contribuye más al agotamiento de los recursos abióticos es la fase de construcción con $1.80E-03$ [MJ] (23.5%) del total, ver detalles en la tabla

6 causado por el consumo energético a lo largo de todos los procesos de producción de energía eléctrica a partir de la geotermia. La segunda fase que contribuye al ADP es la fase de construcción debido al consumo de aluminio y acero inoxidable.

6. 2. 3 Potencial de Acidificación (AP)

EL potencial de acidificación total es de 0. 168 [Kg SO₂-eq/ kWh] ver detalle en la tabla 6. La fase de mayor contribución es la fase de operación con un porcentaje del (38. 19 %). En la fase de operación hay una gran cantidad de emisiones, lo que aparece explicado detalladamente en el capítulo 5. Por lo que se ha identificado que las emisiones provenientes de esta etapa son claramente la causa principal de la acidificación potencial, mientras que las contribuciones de la fase de operación y mantenimiento son mínimas.

6. 2. 4 Potencial de Eutrofización (PE)

El potencial de Eutrofización total es 0. 0162 [kg fosfato-eq/kWh] ver detalle en la Tabla 6, el mayor aporte a este impacto potencial es de la fase de operación con un aporte de 0. 0154[kg fosfato-eq/kWh], impacto asociado fundamentalmente a las emisiones de la etapa de operación.

6. 2. 5 Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce (FAETP)

El potencial de Eutrofización total es 1. 4 E-03 [kg fosfato-eq/kWh] ver detalle en la Tabla 6, el mayor aporte a este impacto ambiental esta dado por la construcción de la planta geotérmica.

6. 2. 6 Potencial de Calentamiento Global (GWP)

El potencial de calentamiento global a lo largo de todo el ciclo de vida del sistema es de 1.95×10^{-2} [kg CO₂-eq/kWh] ver detalle en la Tabla 6. La mayor contribución está dada por la fase de operación con un aporte de 44.20% por el gasto indirecto de energía de la producción de energía geotérmica y las emisiones generadas durante esta fase.

6.2.7 Potencia de Toxicidad Humana (HTP)

El potencial de toxicidad humana total es de 0.029 [kg DCB-eq] ver detalle en la Tabla 6. Las contribuciones a este impacto potencial son de aproximadamente el 5% para todas las etapas.

6.2.8 Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina (MAETP)

El potencial de ecotoxicidad acuática marina es de 0.0694 [kg DCB-eq]. La mayor contribución a esta etapa es la fase de construcción de la planta con un 82.9265% con (0.0636 [kg DCB-eq]) debido a la profundidad de los pozos, seguido por la fase de mantenimiento con un aporte de 0.00581[kg DCB-eq], la causa de los impactos de estas fases se debe a la construcción y mantenimiento de los pozos geotérmicos.

6.2.9 Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP)

El potencial de agotamiento de la capa de ozono a lo largo de todo el ciclo de vida es de 3.65×10^{-5} [kg R11-eq] ver detalle en la Tabla 6. La fase que contribuye casi en su totalidad a este impacto ambiental es la fase de construcción de la planta.

6. 2. 10 Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP)

El potencial de creación de ozono fotoquímico a lo largo de todo el ciclo de vida es de 0. 0385 [kg etano-eq]. La mayor contribución a este impacto ambiental es la de la fase de operación con el 8. 42% de su impacto total- Con un valor absoluto de 0. 0367 [kg etano-eq]. Derivado de las emisiones de la etapa de operación. El segundo punto crítico fue identificado como las emisiones de la etapa de construcción, aunque estas no se consideran en el estudio.

6. 2. 11 Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TETP)

El potencial de ecotoxicidad terrestre total es de 8. 79 E-05 [g DCB-eq]. El componente con mayor contribución es la etapa de construcción de la planta, aunque sus impactos ambientales potenciales son mínimos en el análisis de ciclo de vida de la planta geotermoeléctrica.

6. 3 Resumen del análisis del caso base

En resumen, hay tres categorías de impacto cuya principal contribución proviene de la etapa de operación, siendo esta la de mayor impacto en la producción de energía eléctrica con fuentes geotérmicas para una planta de flasheo simple. Estas categorías incluyen AP, GWP y POCP. Estos resultados resaltan la importancia de las emisiones emitidas naturalmente desde el sitio geotérmico y la fase de operación de la planta. Es muy importante tener en cuenta estas emisiones para el análisis de los impactos de la producción de energía geotérmica. Las fases de mantenimiento y construcción tienen su mayor impacto ambiental en el Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina.

6. 4 Comparación con otras tecnologías de generación de electricidad a partir de la geotermia

De acuerdo a (Mora, 2010) la descarga de CO₂ de estas centrales oscila entre 13-380 g CO₂/KWh la estimación promedio mundial es de 122 g CO₂/KWh , Estados Unidos de Norteamérica reporta 106 g CO₂/KWh , Nueva Zelanda (123 g CO₂/KWh Islandia (34 g CO₂/KWh Italia 330 g CO₂/KWh g CO₂/KWh y Turquía (900g a 1300 g CO₂/KWh (“World Energy Resources | 2016, ” 2016);por lo que el resultado del estudio 195 g CO₂/KWh para una unidad de flasheo simple de 25 MW en México, queda dentro de los parámetros mundiales, aunque se estima que errores en las mediciones puedan haber conducido a errores en los resultados por lo que se recomienda un trabajo más delicado a la hora de medir emisiones de la industria geotérmica mexicana. Los datos de la ilustración 10 que se muestran a continuación son el promedio de emisión para todas las tecnologías de producción geotérmica (flash, binaria, vapor seco) de algunos países seleccionados por su representatividad.

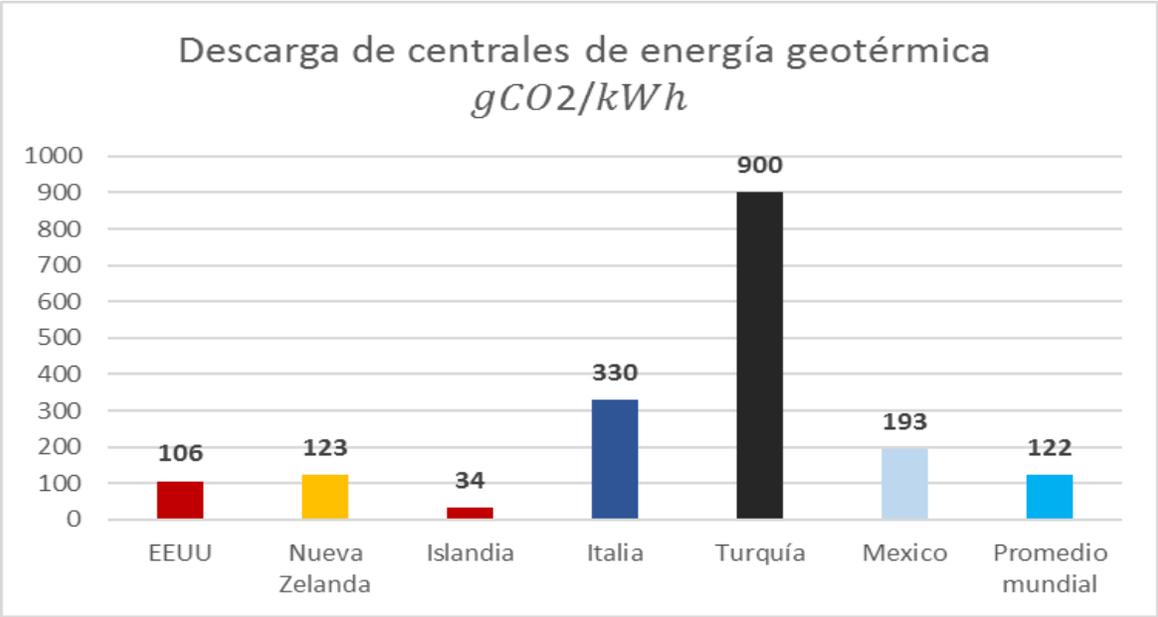


Ilustración 10. Promedio de emisión de g CO₂/KWh para tecnologías de producción de energía eléctrica a partir de la geotermia.

6. 5 Análisis de sensibilidad

Hasta este punto se han revisado los resultados obtenidos para cada una de las categorías de impacto del análisis de ciclo de vida del caso base, el análisis de los resultados lleva a la identificación de Diesel (consumido por el grupo electrógeno Diesel, que se usa durante las actividades de perforación) y acero (requerido para la cubierta del pozo geotérmico y las tuberías de recolección) como la causa principal de los impactos producidos por las fases de construcción y mantenimiento del sistema (ver anexo 1), mientras que las emisiones de la planta constituyeron el principal punto crítico a la hora de evaluar el impacto ambiental potencial del sistema.

Como resultado del análisis de sensibilidad, es posible concluir que el modelo es altamente sensible a la variación de los parámetros bajo análisis. El diesel consumido por las plataformas de perforación está directamente relacionado con las características geológicas del reservorio, que a su vez determina la profundidad de los pozos geotérmicos considerados. Por lo tanto, los hallazgos de este análisis resaltan la importancia de crear inventarios del ciclo de vida que puedan contribuir al análisis de las plantas de energía geotérmica en todo el mundo. Es importante mencionar que estos inventarios de ciclo de vida deben incluir información sobre las emisiones de la línea de base del reservorio geotérmico, esto es importante para: asignar los impactos ambientales producidos a lo largo del ciclo de vida de la planta de energía geotérmica sin tener en cuenta las emisiones naturales que de otro modo se producirían naturalmente. Las emisiones producidas durante la etapa de operación resultan determinantes para los impactos ambientales de la planta por lo que se recomienda, incrementar las medidas y planes para disminuir las emisiones.

A continuación, se describen los dos casos de análisis de sensibilidad, en el caso A se procede a mezclar el Diesel utilizado en la fase de construcción con un 10% de etanol, manteniendo las características generales del sistema de referencia

iguales. En el caso B se modificarán las emisiones provenientes de la etapa de operación utilizando como dato el percentil 25 del análisis estadístico descrito en el capítulo 5.

6. 5. 1 Caso A

El cambio realizado para el caso A es la mezcla del diesel utilizado en la perforación con un 10% de etanol, varios autores indican, que trabajando en las condiciones adecuadas, se consiguen reducir las emisiones de CO, materia particulada (tipo hollín) y óxidos de nitrógeno (Marrod et al. 2017).

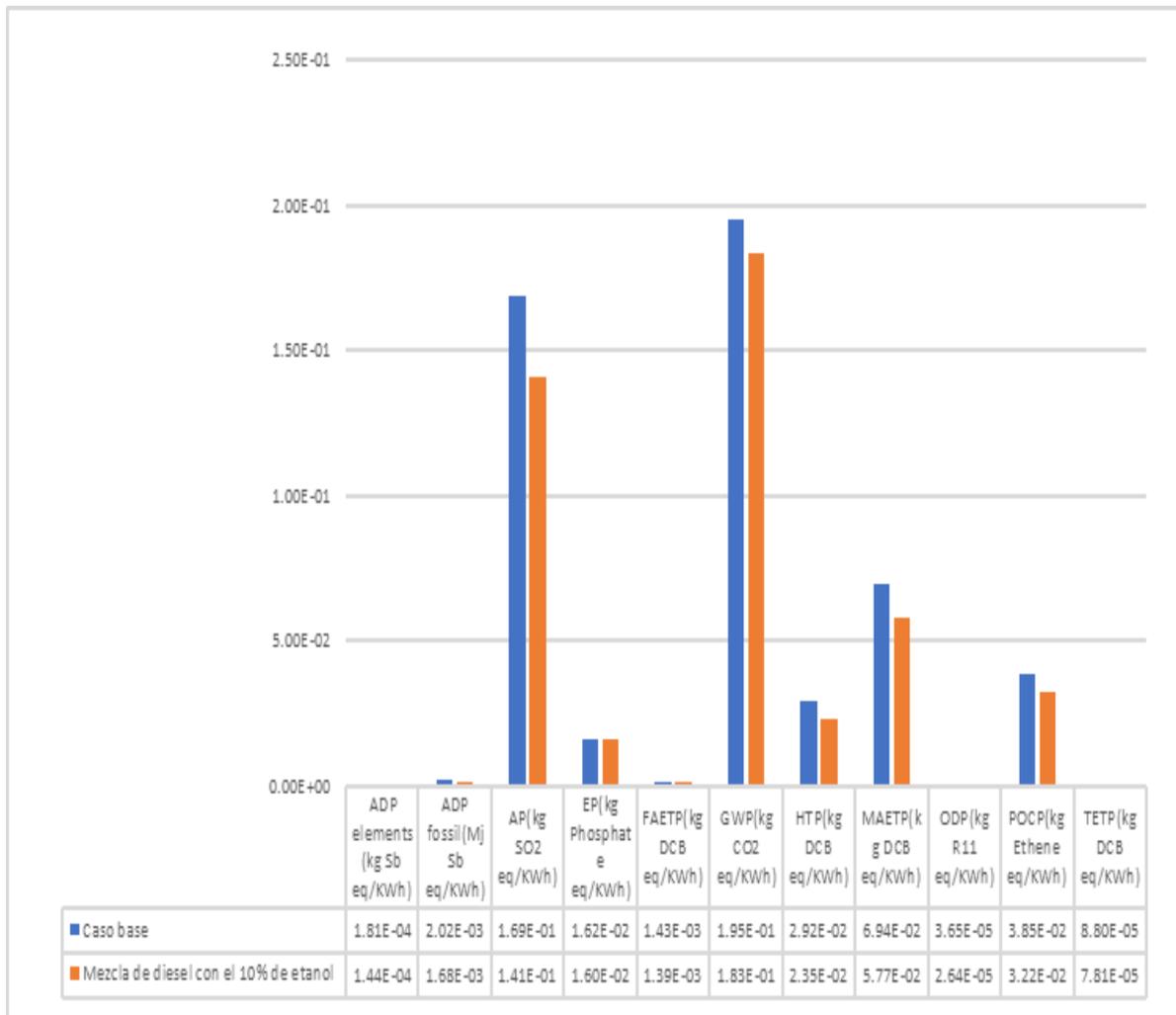


Ilustración 11. Comparación de impactos ambientales potenciales entre Caso Base y Caso mezcla de diesel con 10% de etanol

Al mezclar el Diesel utilizado en la construcción con un 10% de etanol se observa en la gráfica como hay una reducción en los impactos ambientales potenciales, en la siguiente tabla se muestra la disminución porcentual del caso A con respecto al escenario base. En la tabla 7 se muestran los valores utilizados para la elaboración de las gráficas.

Tabla 7. Relación de cambio de los impactos ambientales entre el caso base y el caso A

Impactos Ambientales Potenciales	Caso base	Mezcla de diesel con el 10% de etanol	Disminución Porcentual
ADP elements(kg Sb eq/KWh)	1.81E-04	1.44E-04	0.20
ADP fossil(Mj Sb eq/KWh)	2.02E-03	1.68E-03	0.17
AP(kg SO2 eq/KWh)	1.69E-01	1.41E-01	0.16
EP(kg Phosphate eq/KWh)	1.62E-02	1.60E-02	0.01
FAETP(kg DCB eq/KWh)	1.43E-03	1.39E-03	0.03
GWP(kg CO2 eq/KWh)	1.95E-01	1.83E-01	0.06
HTP(kg DCB eq/KWh)	2.92E-02	2.35E-02	0.19
MAETP(kg DCB eq/KWh)	6.94E-02	5.77E-02	0.17
ODP(kg R11 eq/KWh)	3.65E-05	2.64E-05	0.28
POCP(kg Ethene eq/KWh)	3.85E-02	3.22E-02	0.17
TETP(kg DCB eq/KWh)	8.80E-05	7.81E-05	0.11

Al analizar la disminución se observa una disminución de los impactos ambientales fundamentalmente en el ADP, AP, ATP, MAET y ODP, esto se debe a que el diesel es fundamental en los impactos ambientales potenciales del sistema y cualquier cambio por pequeño que sea en su composición afectará al sistema completo, el potencial de agotamiento de la capa de ozono ODP es el de mayor disminución porcentual.

6. 5. 2 Caso B

El cambio realizado para el caso B es la disminución de las emisiones utilizando el primer cuartil de las emisiones descritas en el capítulo 5.

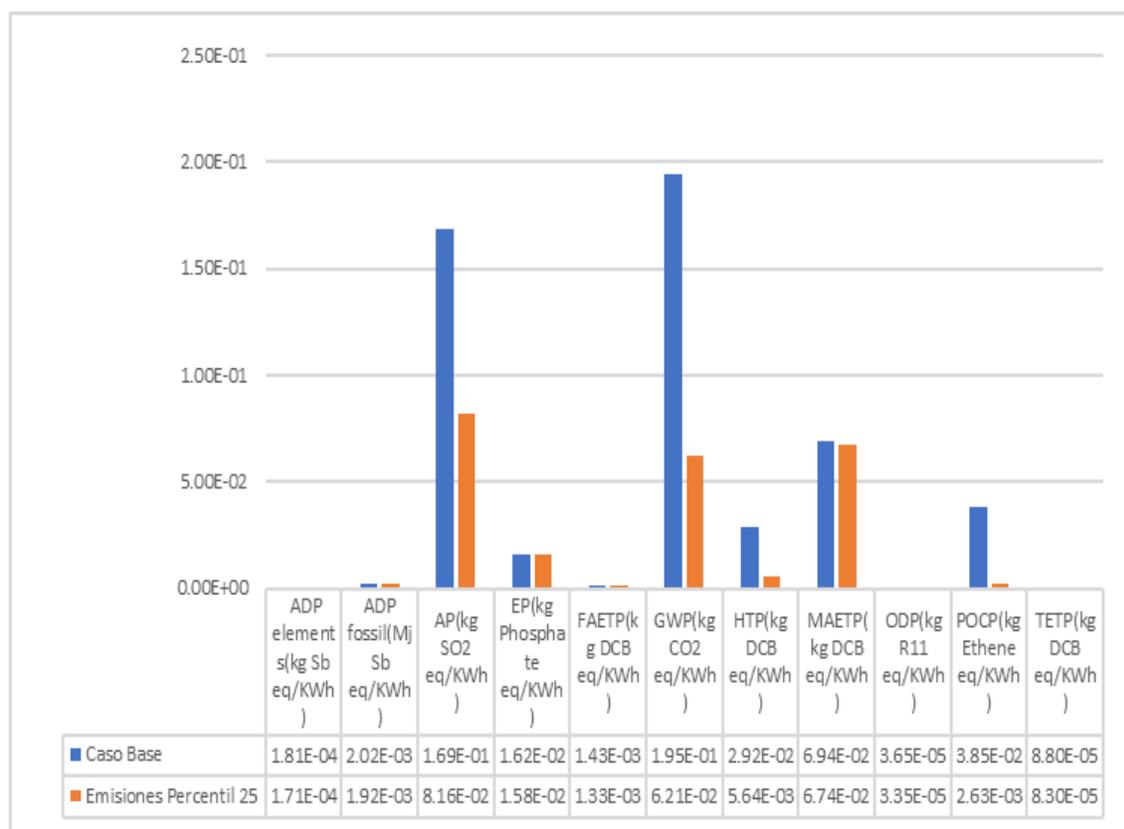


Ilustración 12. Comparacion de impactos ambientales potenciales entre Caso Base y Caso Reducción de Emisiones

Al reducir las emisiones se observa como los impactos ambientales decrecen visiblemente, siendo las emisiones de la etapa de operación contribuidores principales al impacto ambiental potencial del ciclo de vida de la planta geotermoeléctrica.

En la siguiente tabla se muestra la distribución porcentual del caso B con respecto al escenario base.

Tabla 1. Relación de cambio de los impactos ambientales entre el caso base y el caso B

	Caso Base	Emisiones Percentil 25	Porcentaje de diferenciación
	Valor absoluto	Valor absoluto	Valor porcentual
ADP elements(kg Sb eq/KWh)	1.81E-04	1.71E-04	0.0552
ADP fossil(Mj Sb eq/KWh)	2.02E-03	1.92E-03	0.0495
AP(kg SO2 eq/KWh)	1.69E-01	8.16E-02	0.5156
EP(kg Phosphate eq/KWh)	1.62E-02	1.58E-02	0.0246
FAETP(kg DCB eq/KWh)	1.43E-03	1.33E-03	0.0698
GWP(kg CO2 eq/KWh)	1.95E-01	6.21E-02	0.6809
HTP(kg DCB eq/KWh)	2.92E-02	5.64E-03	0.8066
MAETP(kg DCB eq/KWh)	6.94E-02	6.74E-02	0.0288
ODP(kg R11 eq/KWh)	3.65E-05	3.35E-05	0.0823
POCP(kg Ethene eq/KWh)	3.85E-02	2.63E-03	0.9318
TETP(kg DCB eq/KWh)	8.80E-05	8.30E-05	0.0568

La disminución de las emisiones en el caso del estudio propuesto se realiza mediante técnicas estadísticas, se observa la utilidad para la producción de este tipo de energía de un plan de medidas para la reducción de emisiones en su fase de operación, en el caso específico del estudio los impactos que presentan mayor disminución porcentual son el HTP, el POCP, AP y el GWP, este último es el que utilizamos para comparar los resultados del estudio con otras tecnologías, lo que se describe en el siguiente epígrafe.

6. 6 Comparación con estudios similares para diferentes tecnologías de generación eléctrica

Si se examina el ciclo de vida completo de la energía geotérmica, los impactos medioambientales son destacadamente menores que los existentes en las centrales térmicas de combustibles fósiles y nucleares, incluso menores en comparación con otras fuentes de energías renovables. Esto es fundamentalmente porque como la fuente de energía geotérmica está en el interior de la Tierra, los equipos de generación eléctrica son relativamente compactos, haciendo que la instalación completa sea más pequeña y, por tanto, el área de terreno requerido por las plantas geotérmicas es mucho menor que el que necesita otro tipo de plantas. De forma aproximada, una planta térmica de gas ocuparía tres veces más espacio que una geotérmica y una de carbón hasta ocho veces más.

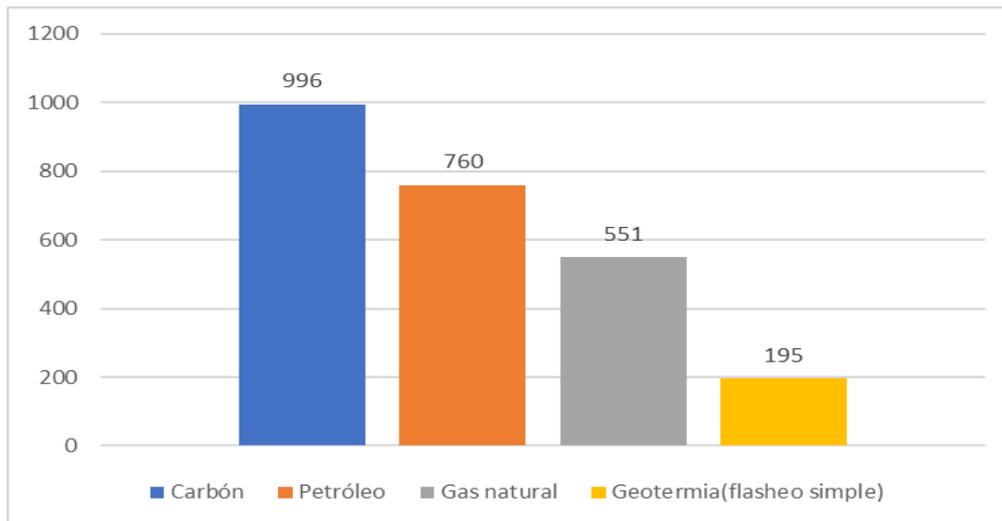


Ilustración 13. Impactos ambientales potenciales GWP medido en g de CO₂eq/KWh (Shortall & Kharrazi, 2017)

7. Conclusiones y recomendaciones

Debido al papel crucial de la energía en la economía mundial y como un desencadenante de la igualdad social en todo el mundo, la amenaza potencial de alcanzar un pico en la producción de recursos fósiles conduce al análisis de los recursos de energía renovable para satisfacer la creciente demanda de energía de la sociedad. Sin embargo, para explotar estos recursos energéticos alternativos de manera sostenible, se requiere información sobre sus impactos económicos, sociales y ambientales. Entre otros recursos de energía renovable, el presente estudio contribuye al análisis de la dimensión ambiental de la electricidad generada por la energía geotérmica.

Teniendo en cuenta que los recursos se consumen y las emisiones se producen a lo largo del ciclo de vida de un proyecto de energía geotérmica, se ha utilizado un enfoque de ciclo de vida para identificar y cuantificar los impactos ambientales del ciclo de vida de una planta de energía geotérmica de flasheo simple. Existe poca información sobre este tipo de impactos en México, donde el desarrollo del potencial geotérmico podría representar un aporte decisivo a la descarbonización de la matriz energética mexicana

7.1 Caso Base

Los resultados obtenidos para el caso base fueron de 195 g de CO₂eq/KWh de emisiones de GEI para la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global. La fase de operación tiene la mayor contribución en el potencial de calentamiento global GWP (44.2 %) y a la acidificación potencial del sistema (38.19 %). Esta fase también contribuye en menor medida a la creación de ozono fotoquímico con 8.42%, mientras que la contribución, de las etapas de mantenimiento y de operación es mayor para el potencial de ecotoxicidad marina fundamentalmente con impactos de 79.8% y 82.92 % respectivamente este

impacto se debe fundamentalmente al diesel utilizado en la construcción y mantenimiento de los pozos, y a la profundidad de los mismos.

Las emisiones provenientes de la etapa de operación son los principales responsables de GWP, AP y POCP, que contribuyen al 44. 2%, 38. 19% y 8. 42% de los valores estimados para estos impactos potenciales, asociados a la fase de operación.

7.2 Análisis de sensibilidad

Sobre la base de estos resultados, los resultados del análisis de sensibilidad señalan que la mezcla del diesel utilizado en la perforación de los pozos con un 10% contribuye a una disminución de los impactos ambientales, con una variación desde un 0. 1 para EP hasta un 0. 28% para ODP, esto se debe a que disminuye destrucción de ozono estratosférico causado por el diesel al mezclarlo con 10% de etanol.

El porcentaje de diferenciación al realizar la comparación del caso base y el análisis de sensibilidad del caso B es mayor para el GWP con 0.68, el HTP con un valor porcentual de 0.8066 siendo el más significativo el POCP con 0.9 % debido a la reducción de emisiones, con la consecuente reducción de los impactos ambientales potenciales asociados a la planta.

7.3 Recomendaciones

Aunque se reconoce la importancia de los datos específicos del sitio, debido a la falta de información de una planta de energía geotérmica particular, el LCA se ha realizado sobre la base de la información de un reservorio de alta entalpía que se asemeja a una planta de energía geotérmica instantánea en México. Se ha utilizado información de fuentes libremente disponibles considerando una planta con características similares a las del estudio, los resultados del presente estudio permiten establecer las siguientes recomendaciones:

Como herramienta informativa, los resultados de este estudio son potencialmente valiosos para quienes toman decisiones en el mercado de la energía, en primer lugar, en México, donde se están realizando notables esfuerzos en el ámbito legislativo para contribuir a la reducción de la temperatura global. Esta información se puede utilizar para ayudar a cuantificar las externalidades ambientales de un proyecto geotérmico. En segundo lugar, los resultados de este estudio también son una pieza importante de información en el análisis de las compensaciones entre los impactos socioeconómicos inherentes a un proyecto geotérmico.

El análisis de los impactos ambientales del ciclo de vida de los proyectos geotérmicos en todo el mundo contribuiría a identificar los aspectos negativos y positivos producidos a lo largo del ciclo de vida de estos proyectos. Tal vez, lo que es más importante, la implementación de esta información durante el proceso de toma de decisiones entre la compensación de los impactos ambientales y socioeconómicos de los diferentes recursos energéticos contribuiría a la evaluación de la sostenibilidad de la diversificación de la matriz energética. Particularmente en México, donde debido a la GEL, se espera un aumento en el desarrollo de proyectos geotérmicos y, en general, en el mundo donde el potencial de los proyectos de energía geotérmica podría desempeñar un papel clave en la diversificación de la matriz energética mundial.

Este estudio se realizó para una planta geotermoeléctrica de flasheo simple Sin embargo queda considerar por el interés para la generación eléctrica las demás tecnologías instaladas en el país. La implementación de esta información durante el proceso de toma de decisiones entre la compensación de los impactos ambientales y socioeconómicos de los diferentes recursos energéticos contribuiría a la evaluación de la sostenibilidad de la diversificación de la matriz energética. Particularmente en México, donde debido a la GEL, se espera un aumento en el desarrollo de proyectos geotérmicos y, en general, en el mundo donde el potencial de los proyectos de energía geotérmica podría desempeñar un papel clave en la diversificación de la matriz energética mundial.

Este estudio se realizó para una planta geotermoeléctrica de flasheo simple Sin embargo queda considerar por el interés para la generación eléctrica las demás tecnologías instaladas en el país.

Bibliografía

1. AIE. (2009). *Energy Policy Review*. Francia.
2. Axelsson, G. (2010). Sustainable geothermal utilization - Case histories; definitions; research issues and modelling. *Geothermics*, 39 (4), 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.08.001>
3. Barragán-reyes, R. M. , Arellano-gómez, V. M. , & Portugal-marín, E. (2018). Características bifásicas del fluido de alimentación de pozos de Gerro Prieto IV (México), por equilibrio obtenidas gaseoso, (November).
4. Barbier , E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3-65.
5. Barriga Grez, S. A. (2007). *ELECTRICAL GEOTHERMIC POWER GENERATION IN CHILE: ANALYSIS OF CONDITIONS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT* . Concepción: Universidad del Bío Bío .
6. Baumann, H. , & Tillman, A. -M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA: An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Applications*. Sweden: Studentlitteratur AB.
7. Brophy , P. (1997). Environmental advantages to the utilization of geothermal energy. *Renewable Energy*, 367-377.
8. Bj, A. , Molin, C. , & Laurent, A. (n. d.). Main Characteristics of LCA, 9–17. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
9. Bruni, S. (2014). La Energía Geotérmica. *Centro de Innovación Energética*, 10. Retrieved from http://www.ceja.org.mx/DAYE/Editorial72/La_Ener_Geoter_Mex.pdf
10. Camazón, C. C. (2009). Energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos . Estado actual y perspectivas a nivel mundial, 84, 44–51.

11. Castelar, R. O. , Gutiérrez, A. G. , Ignacio, J. , Estrella, M. , Félix, I. C. , Galván, P. J. , ... Mora, O. (2011). del campo geotérmico de Cerro Prieto , BC , con base en el estado físico del aislamiento térmico de vaporductos Determination of heat losses in the Cerro Prieto , BC , geothermal field steam transportation network based on the thermal insulation condition of the steam pipelines, *24* (2), 11–24.
12. Cemiego. (24 de 09 de 2018). *Cemiego*. Obtenido de Cemiego: <http://www.cemiego.org/index.php/geotermia-en-mexico>
13. Congreso Unión, C. (1917). *CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS*. Recuperado el 02 de 07 de 2017, de <http://www.diputados.gob.mx>: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/1_240217.pdf
14. Ciencia, C. N. D. E. , Tem, R. E. D. , & Bioenerg, T. D. E. (2016). Análisis de ciclo de vida de la bioenergía en México, 1–32.
15. Davidsdottir, B. (2012). *Sustainable energy development: The role of geothermal power. Comprehensive Renewable Energy* (Vol. 7). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00715-0>
16. De, A. P. A. (2017). MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA GEOTERMIA : MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA GEOTERMIA :
17. Di Pippo, R. , & DiPippo, R. (2012). *Geothermal Power Plants. Geothermal Power Plants*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098206-9.00024-5>
18. Dincer, I. (2018). *1. 17 Geothermal Energy* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00119-X>
19. Draft, Z. O. (n. d.). Chapter 4 Geothermal Energy.
20. Dolezal, A. , & Majano, A. M. (2013). *The Way Forward for Renewable Energy in Central America*. Washington, D. C. : Worldwatch Institute.

- 21.ecoinvent. (10 de 28 de 2018). *ecoinvent version 3*. Obtenido de ecoinvent version 3: <https://www.ecoinvent.org/database/database.html>
22. *Energía geotérmica: Aprovechando la Potencia de la Tierra para Impulsar el Futuro Energético de Chile*. (11 de 2013). Recuperado el 13 de 07 de 2017, de [www.laondaverde.org: http://www.laondaverde.org/international/files/chile-geothermal-IB-sp.pdf](http://www.laondaverde.org/international/files/chile-geothermal-IB-sp.pdf)
- 23.Fava, J. (1997). LCA: Concept, Methodology, or Strategy? *Journal of industrial ecology*, 8-10.
- 24.Fernández Muerza, A. (22 de 12 de 2006). *Geotérmica: Electricidad y calefacción del subsuelo*. Recuperado el 13 de 06 de 2017, de EROSKI CONSUMER, el diario del consumidor: http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2006/12/22/158388.php
- 25.Ferreira, L. (2014). *Metodología de Línea Base de Emisiones GEI y Escenarios de Reducción para Proyectos de Transporte Público*. Ciudad de México: USAID.
- 26.Finkbeiner, M. , Wiedemann, M. , & Saur, K. (1998). A comprehensive approach towards product and organisation related environmental management tools. *Int J Life Cycle Assess*, 169-178.
- 27.Flores Armenta, M. , Gutiérrez-Negrín, L. , & Nieva, D. (2014). *IEA Geothermal Implementing Agreement*. Ciudad de México: IEA Geothermal.
- 28.Frischknecht, R. , Editors, N. J. , Althaus, H. , Bauer, C. , Doka, G. , Dones, R. , ... Margni, M. (2007). *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*, (3).

29. González Acevedo, Z. I. (2017). La sustentabilidad de la energía geotérmica y sus impactos ambientales. *INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO REVISTA DIGITAL*, 137-141.
30. GR. (2013). *Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energías Renovables en México*. Ciudad de México: SENER.
31. Gutiérrez-Negrín, L. (19-25 de 04 de 2015). *Mexican Geothermal Plays*. Recuperado el 27 de 06 de 2017, de Proceedings World Geothermal Congress 2015: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/11078.pdf>
32. Gutierrez-Negrin, L. C. (2007). 1997-2006: A decade of geothermal power generation in Mexico. *Geothermal Resources Council Transactions*, 167-171.
33. Gutiérrez-Negrín, L. C. (2015). *La energía geotérmica en México*.
34. Guzmán, J. S. (2011). *Evaluación del potencial de energía geotérmica*. Madrid: IDAE.
35. Güereca, L. P. , Sosa, R. O. , Gilbert, H. E. , & Reynaga, N. S. (2015). Life cycle assessment in Mexico: overview of development and implementation. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20 (3). <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0844-9>
36. Hancioglu Kuzgunkaya, E. (2015). Evaluation of Turkey's Geothermal Energy Resources in terms of Exergy Analysis. *World Geothermal Congress 2015*, 8 (April), 1–9. Retrieved from <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/16018.pdf>
37. Heiskanen, E. (2002). The institutional logic of life cycle thinking. *J Clean Prod*, 427-437.

- 38.Hunkeler. (2004). *Life cycle management*. Pensacola FL: SETAC.
- 39.Jensen, A. (2012). *The business case of life cycle management – how to create a sustainable value chain*. Shanghai: Shanghai Second Polytechnic University.
- 40.Jianchao, H. , Mengchao, C. , & Pingkuo, L. (2018). Development and utilization of geothermal energy in China: Current practices and future strategies. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.115>
- 41.Karlsdóttir, M. R. , Pálsson, Ó. P. , Pálsson, H. , & Maya-Drysdale, L. (2015). Life cycle inventory of a flash geothermal combined heat and power plant located in Iceland. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20 (4), 503–519. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0842-y>
- 42.Labandeira, X. , Linares, P. , & Würzburga, K. (2012). Energías Renovables y Cambio Climático. *Economis for energy*.
- 43.Lacourt Mora, O. E. (2010). *Análisis de diversas alternativas de generación eléctrica con fuentes geotermiales en Chile*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- 44.Linnanen, L. (1995). Life cycle management: integrated approach towards corporate environmental issues. *Bus Strategy Environ*, 117–127.
- 45.Llopis Trillo , G. , & Rodrigo Angulo, V. (2014). *Guía de la energía geotermica*. Madrid: Energy Management Agency.
- 46.Ley de Energía Geotérmica. (2014), 1–22. Retrieved from http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LEG_110814.pdf
- 47.Limberger, J. , Boxem, T. , Pluymaekers, M. , Bruhn, D. , Manzella, A. , Calcagno, P. , ... van Wees, J. D. (2018). Geothermal energy in deep aquifers: A global assessment of the resource base for direct heat

- utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (November 2016), 961–975. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.084>
48. Malafeh, S. , & Sharp, B. (2015). Role of royalties in sustainable geothermal energy development. *Energy Policy*, 85, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.06.023>
49. Marrodán, L. , Fuster, M. , Millera, Á. , Bilbao, R. , & Alzueta, M. U. (2017). Etanol como aditivo para combustibles : estudio de la oxidación a alta presión de sus mezclas con acetileno Introducción y objetivos Metodología Resultados, 5, 2–3.
50. Mahood, G. (1980). Geological evolution of a Pleistocene rhyolitic center: Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 199-210.
51. Maya González, R. , & Gutiérrez Negrín, L. (10 de 12 de 2007). *Recursos geotérmicos para generar electricidad en México*. Recuperado el 22 de 05 de 2017, de Revista diital universitaria: <http://www.revista.unam.mx/vol.8/num12/art91/int91.htm>
52. MEXICANOS, C. D. (1975). *LEY DEL SERVICIO PÚBLICO DE ENERGÍA ELÉCTRICA*. Ciudad de México.
53. mexicanos, C. d. (1992). *LEY DE AGUAS NACIONALES*. Ciudad de México.
54. Mexicanos, C. d. (2009). *REGLAMENTO DE LA LEY PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES Y EL FINANCIAMIENTO DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA*. Ciudad de México: Diario Oficial.

55. Mexicanos, C. d. (2009). *REGLAMENTO DE LA LEY PARA EL APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE LA ENERGÍA*. Ciudad de México: Diario Oficial.
56. Mexicanos, C. d. (2012). *Ley General de Cambio Climático*. Ciudad de México: Diario Oficial.
57. Mexicanos, C. d. (2014). *Ley de Energía Geotérmica*. Ciudad de México: Diario Oficial.
58. Mims, C. (2010). *One Hot Island: Iceland's Renewable Geothermal Power*. New Zealand : Agencia Internacional de la Energía. .
59. Naciones Unidas. Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo. (1987). *Nuestro futuro común (Informe Brundtland)*. <https://doi.org/10.3917/ridp.723.0975>
60. Ocampo-díaz, J. D. D. (2005). CERRO PRIETO IV , THE NEWEST POWER PLANT IN CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD.
61. OECD/ IEA. (2014). Heating without global warming. *Featured Insight*, 92. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.070>
62. ONU. (1992). *Principios del desarrollo sostenible*. Río de Janeiro: ONU.
63. Phillips, J. (2010). Evaluating the level and nature of sustainable development for a geothermal power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2414–2425.
64. Richter, A. (2017). Biliran geothermal plant could start operation in September 2018 | Think GeoEnergy - Geothermal Energy News.
65. Rojas Hernández, J. D. (2016). *Análisis del ciclo de vida de la construcción de pozos geotérmicos para la producción de electricidad*. Temixco, Morelos: IER.

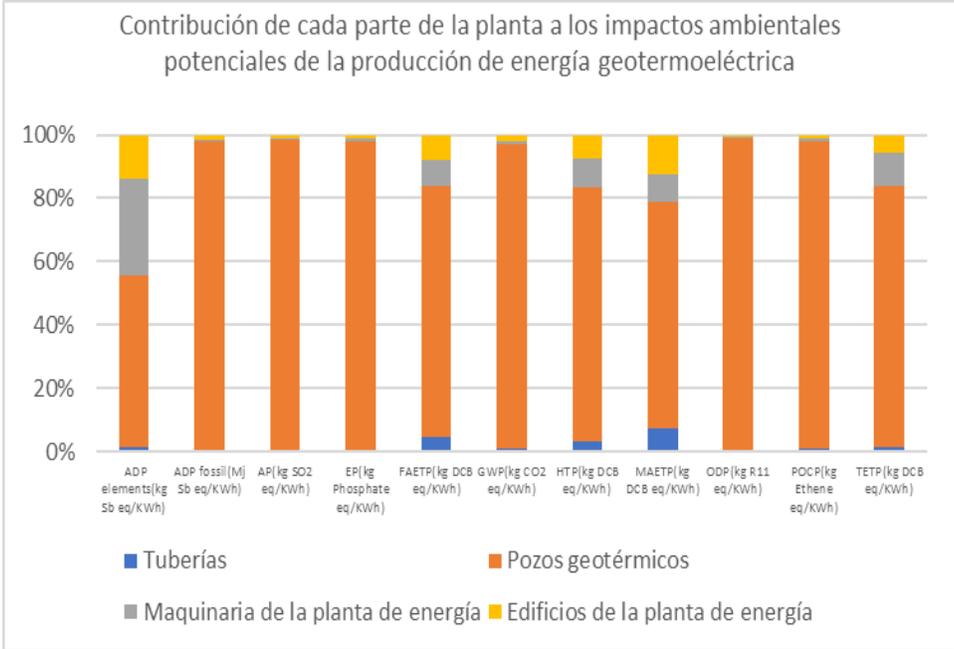
66. Santos, J. J. C. S. , Rodríguez, C. E. C. , Carvalho, M. , Barone, M. A. , Palacio, J. C. E. , & Carrillo, R. A. M. (2018). *Geothermal Power. Advances in Renewable Energies and Power Technologies* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813185-5.00014-0>
67. Santoyo-Castelazo, E. , & Azapagic, A. (2014). Sustainability assessment of energy systems: Integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.061>
68. Santoyo-Gutiérrez, E. , & Torres-Alvarado, I. S. (2010). Escenario Futuro De Explotación De La Energía Geotérmica: Hacia Un Desarrollo Sustentable. *Digital Universitaria*, 11, 26. <https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2039471>
69. Santoyo, E. (2011). *Geotermia: Energía Renovable Inagotable Del Futuro*. *Actas INAGEQ* (Vol. 17).
70. SENER. (2012). *Iniciativa para el desarrollo de las energías renovables en México*. Ciudad de México: SENER.
71. SENER. (2014). *Estrategia Nacional de Energía*. Ciudad de México: SENER.
72. SENER. (2017). *Balance nacional de Energía*. Ciudad de México: SENER.
73. SENER. (2017). *Mapa de ruta tecnológica en geotermia*. Ciudad de México: SENER.
74. SENER. (2017). *Prospectiva del sector eléctrico 2017-2031*. Ciudad de México: SENER.
75. Sener. (2003). Balance nacional de energía 2002, 184.
76. SENER. (2017a). Prospectiva de Energías Renovables 2017-2031. *Journal of Experimental Psychology: General*, 94 (1), 23–42. Retrieved from <https://www.gob>

mx/cms/uploads/attachment/file/284342/Prospectiva_de_Energ_as_Renova
bles_2017. pdf

- 77.SENER. (2017b). Prospectiva del Sector Eléctrico 2017-2031, 176.
- 78.SENER - Secretaría de Energía. (2017). Reporte de Avance de Energías Limpias 2017. Retrieved from [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/354379/Reporte_de_Avance_de_Energ_as_Limpias_Cierre_2017. pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/354379/Reporte_de_Avance_de_Energ_as_Limpias_Cierre_2017.pdf)
- 79.Shortall, R. , & Kharrazi, A. (2017). Cultural factors of sustainable energy development: A case study of geothermal energy in Iceland and Japan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79 (May), 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.029>
- 80.Standard, I. (1997). INTERNATIONAL assessment - Principles and framework, 1997.
- 81.Standard, I. (1998). Iso 14041, 1998.
- 82.Standard, I. (2000). INTERNATIONAL STANDARD, 2000.
- 83.Su, V. (n. d.). Reforma energética.
- 84.Taylor, M. (04 de 04 de 2013). *“Superando barreras al financiamiento: aplicación de lecciones aprendidas a nivel internacional para activar el mercado de geotermia chileno.* Recuperado el 08 de 07 de 2017, de <http://www.cega.ing.uchile.cl:www.cega.ing.uchile.cl/cega/index.php/es/noticias-destacadas/202-todos-los-actores-de-la-geotermia-se-reunen-en-exitoso-seminario-en-el-cega>.
- 85.Tomasini-Montenegro, C. , Santoyo-Castelazo, E. , Gujba, H. , Romero, R. J. , & Santoyo, E. (2017). Life cycle assessment of geothermal power generation technologies: An updated review. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1119–1136. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.074>

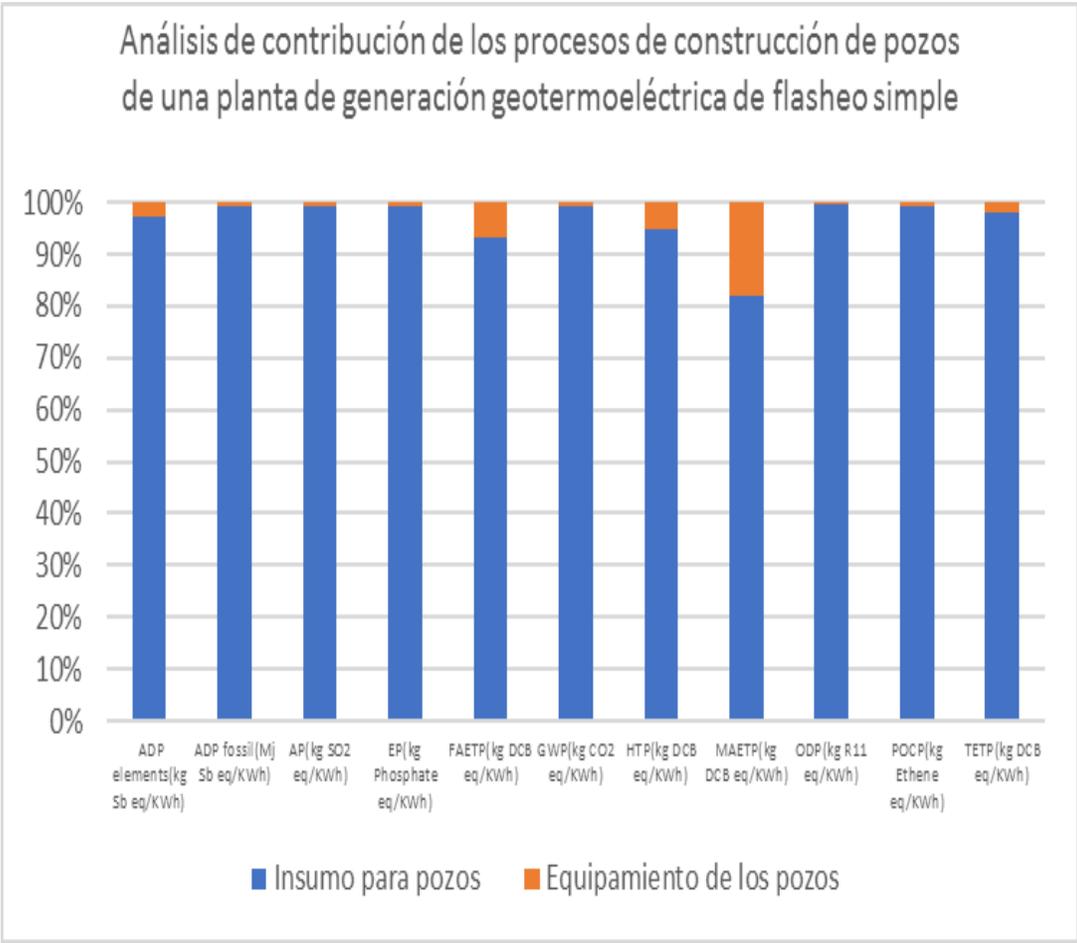
86. UNEP/SETAC. (2009). *Life cycle management: how business uses it to decrease footprint, create opportunities and make value chains more sustainable*. Paris: UNEP.
87. Urrutia, G. V. C. (2017). Un sistema energético en transición. *Actualidad Energética – Panamá 2015-2017*. Retrieved from <http://www.energia.gob.pa/energia/wp-content/uploads/sites/2/2018/04/PEN-2017-Versión-Final.pdf>
88. Yu, T. (2017). *A life cycle assessment a bases comparison of large & small scale geo-thermal electricity production system*. Enschede.
89. World Energy Resources | 2016. (2016).
90. IEA. (2017). World Energy Balance. París: IEA.

Anexo 1: Análisis de las contribuciones de los pozos geotérmicos al ciclo de vida de la planta geotermoeléctrica. Fuente: Elaboración Propia



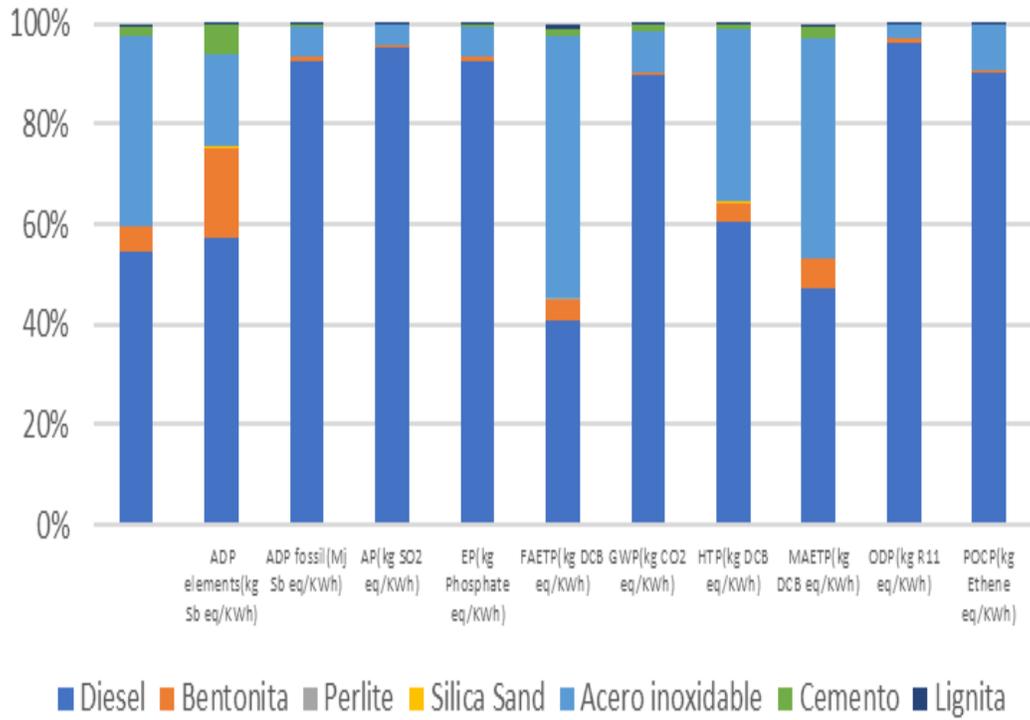
Al analizar la contribución de cada parte de la planta en la fase de construcción al análisis de ciclo de vida de la planta geotermoeléctrica, destacan los pozos geotérmicos como el principal contribuyente.

La fase de construcción de pozos se divide en dos planes procesos independientes, insumos para pozos y equipamiento de pozos, en estos procesos se consideran las contribuciones de las materias primas.



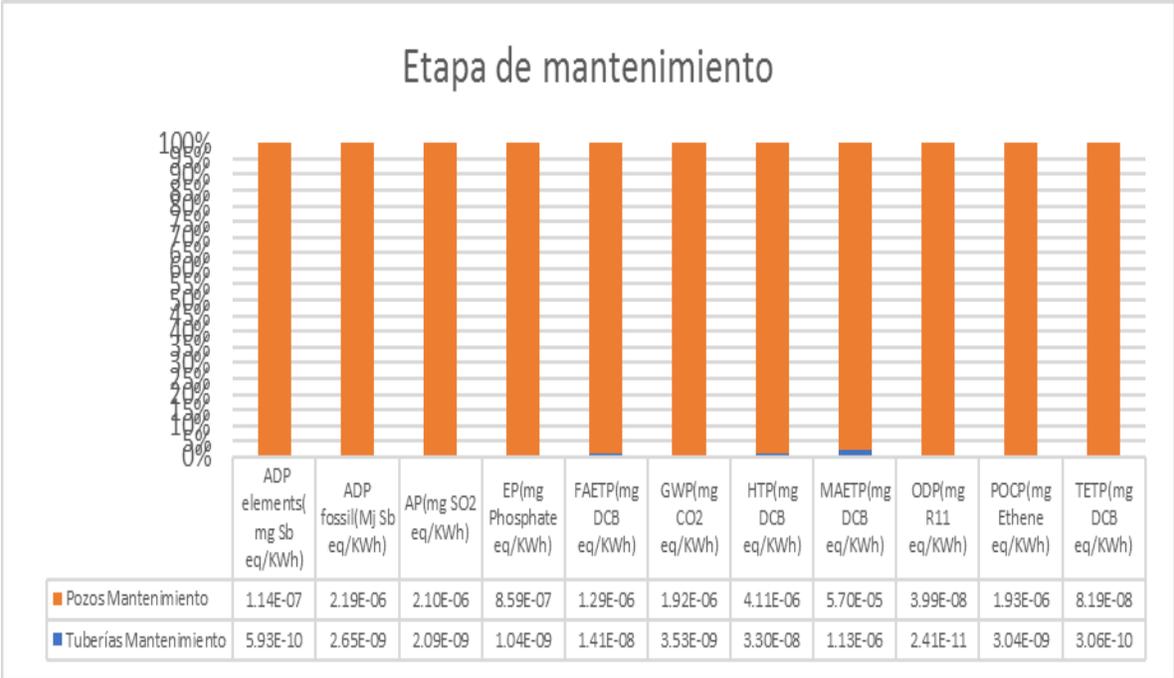
El proceso de insumo para pozos es el de mayor peso en la fase de construcción de pozos geotérmicos por lo que se realizó un análisis más detallado, de manera que el diesel requerido en los diferentes procesos de construcción de pozos es la materia prima de mayor impacto ambiental al realizar el análisis de ciclo de vida de la planta de producción geotermoeléctrica con una contribución del 54,67%, seguido por el acero inoxidable con 37,94%, y la bentonita con 4,80%.

Análisis de contribución de los insumos de construcción de pozos de una planta de generación geotermoeléctrica de flasheo simple



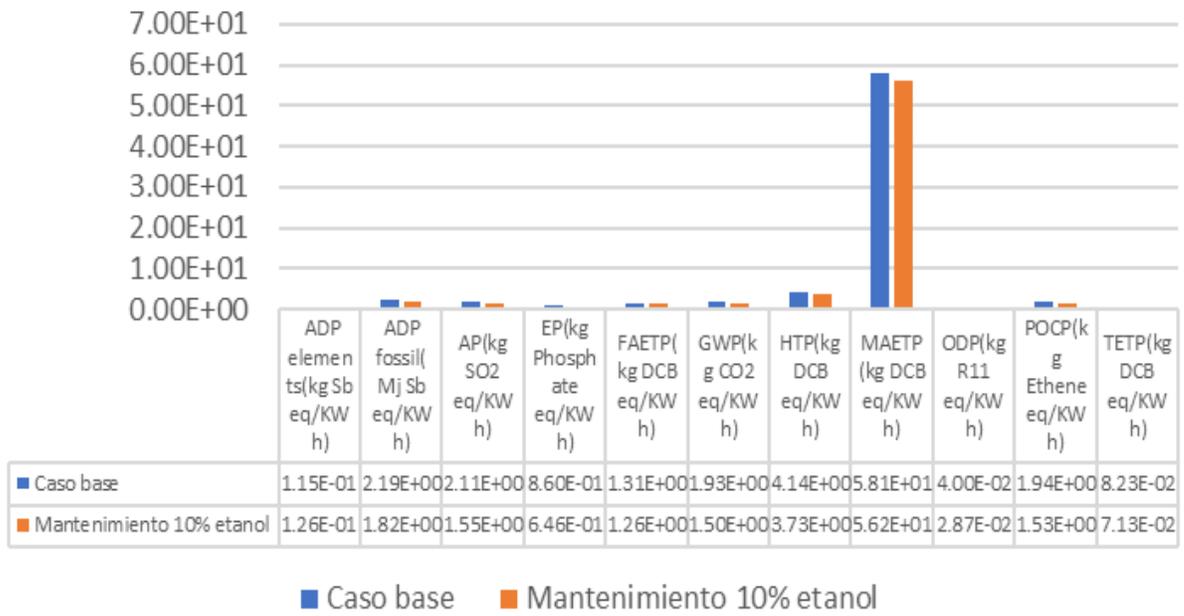
Anexo 2. Análisis de la fase de mantenimiento de la planta de producción geotermoeléctrica.

La contribución relativa de la fase de mantenimiento de los dos procesos contenidos en ella se ve reflejada en la siguiente gráfica:



Se observa como la contribución de los pozos geotérmicos significativamente mayor que la contribución de las tuberías de recolección. Esto se debe a que el diesel utilizado en los pozos geotérmicos tiene gran peso en el impacto ambiental de la planta, como se explicó en el Anexo 1. Al realizar un análisis de sensibilidad donde se realizó una mezcla de diesel con 10% de etanol (ver Caso B) se observa lo siguiente:

Comparación Fase Mantenimiento Caso base vs Análisis de sensibilidad



Los impactos ambientales asociados a la etapa de mantenimiento disminuyen.