



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA  
PARA UNA BOMBA DE CALOR EN MÉXICO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**EDUARDO SEBASTIÁN GONZÁLEZ ESPINOSA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2019**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**                   **Profesor: MARTÍN RIVERA TOLEDO**  
**VOCAL:**                           **Profesor: ALFONSO DURÁN MORENO**  
**SECRETARIO:**               **Profesor: EDGAR SANTOYO CASTELAZO**  
**1er. SUPLENTE:**           **Profesor: ILEANA RODRÍGUEZ CASTAÑEDA**  
**2° SUPLENTE:**               **Profesor: YAMILETH MARTÍNEZ VEGA**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM, CIUDAD UNIVERSITARIA

**ASESOR DEL TEMA:**

---

DR. EDGAR SANTOYO CASTELAZO

**SUPERVISOR TÉCNICO:**

---

DR. HÉCTOR MIGUEL AVIÑA JIMÉNEZ

**SUSTENTANTE:**

---

EDUARDO SEBASTIÁN GONZÁLEZ ESPINOSA

## Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Marco global en sostenibilidad energética</b> .....	<b>3</b>
2.1	Cambio climático.....	3
2.2	Acciones por el cambio climático .....	5
2.3	Desarrollo sostenible .....	7
2.4	Generación de electricidad.....	8
2.5	Generación de electricidad y mitigación de gases de efecto invernadero en México.....	10
2.6	Geotermia .....	13
2.7	Consumo de energía para acondicionamiento de espacios .....	16
2.8	Tecnologías renovables para el calentamiento y enfriamiento de espacios.. .....	19
2.8.1	Bioenergéticos.....	19
2.8.2	Energía solar-térmica .....	21
2.8.3	Recursos geotérmicos superficiales de baja entalpía .....	21
<b>3</b>	<b>Bombas de calor con intercambio de energía térmica con el subsuelo</b> .....	<b>23</b>
3.1	Bombas de calor.....	23
3.1.1	Principio de operación de una bomba de calor.....	24
3.1.2	Desempeño de una bomba de calor.....	25
3.1.3	Componentes del sistema mecánico de refrigeración para una bomba de calor .....	27
3.2	Tipos de bombas de calor .....	28
3.2.1	Bombas de calor fuente aire.....	29
3.2.2	Bombas de calor fuente agua.....	30
3.2.3	Bombas de calor fuente suelo.....	31
3.3	Dimensiones del intercambiador de calor con el subsuelo .....	36
3.4	Sistemas de distribución .....	37
<b>4</b>	<b>Análisis de ciclo de vida</b> .....	<b>39</b>
4.1	Desarrollo y evolución del análisis de ciclo de vida .....	39
4.2	Fases del análisis de ciclo de vida.....	42
4.2.1	Definición de objetivos y alcance del estudio .....	43
4.2.2	Análisis del inventario de ciclo de vida .....	44
4.2.3	Evaluación del impacto .....	45
4.2.4	Interpretación de resultados.....	46
4.3	Administración de datos y herramientas de análisis.....	47

4.3.1	Software GaBi ® .....	48
4.3.2	Metodología CML 2001 .....	48
4.3.3	Base de datos Ecoinvent ® .....	52
4.4	Aplicación del análisis de ciclo de vida en bombas de calor .....	52
5	Análisis de ciclo de vida para una bomba de calor en México .....	56
5.1	Objetivo y alcance del estudio .....	57
5.1.1	Unidad funcional .....	57
5.1.2	Vida útil .....	58
5.1.3	Límites del sistema.....	58
5.1.4	Hipótesis y consideraciones .....	60
5.2	Análisis del inventario de ciclo de vida del sistema .....	61
5.3	Evaluación del impacto.....	66
5.4	Interpretación de resultados.....	70
5.4.1	Potencial de agotamiento de recursos abióticos (ADP Elementos) .....	70
5.4.2	Potencial de agotamiento de recursos abióticos (ADP Fósil) .....	71
5.4.3	Potencial de acidificación (AP).....	71
5.4.4	Potencial de eutrofización (EP) .....	72
5.4.5	Potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce (FAETP) .....	73
5.4.6	Potencial de calentamiento global (GWP).....	73
5.4.7	Potencial de toxicidad humana (HTP).....	74
5.4.8	Potencial de ecotoxicidad acuática marina (MAETP).....	75
5.4.9	Potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP).....	75
5.4.10	Potencial de creación de ozono fotoquímico (POCP) .....	76
5.4.11	Potencial de ecotoxicidad terrestre (TETP) .....	77
5.5	Análisis de sensibilidad de tuberías .....	77
5.6	Análisis de sensibilidad para la fuente energética .....	83
6	Conclusiones y recomendaciones .....	85
7	Bibliografía.....	87
	Anexo I Software GaBi ®.....	95

## Índice de Figuras

FIGURA 2.1 EMISIONES ANTROPÓGENAS ANUALES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO TOTALES POR GRUPOS DE GASES, 1970-2010. FUENTE: CAMBIO CLIMÁTICO 2014: MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO, RESUMEN PARA RESPONSABLES DE POLÍTICAS (IPCC, 2014).	5
FIGURA 2.2 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE. FUENTE: TRANSFORMAR A NUESTRO MUNDO: AGENDA 2030 PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE (UN,2015).	7
FIGURA 2.3 PARTICIPACIÓN ESTIMADA DEL USO DE ENERGÍAS RENOVABLES PARA LA PRODUCCIÓN GLOBAL DE ELECTRICIDAD, 2017. FUENTE: MODIFICADO DE RENEWABLES 2018, GLOBAL STATUS REPORT (REN21, 2018).	9
FIGURA 2.4 CAPACIDAD GLOBAL DE GENERACIÓN RENOVABLE, 2007-2017. FUENTE: MODIFICADO DE RENEWABLES 2018: GLOBAL STATUS REPORT (REN21, 2018).	10
FIGURA 2.5 GENERACIÓN DE ENERGÍA LIMPIA EN MÉXICO, 2018. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE REPORTE DE AVANCE DE ENERGÍAS LIMPIAS PRIMER SEMESTRE 2018 (SENER, 2018).	11
FIGURA 2.6 ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA. FUENTE: ESCENARIO FUTURO DE EXPLOTACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA: HACIA UN DESARROLLO SUSTENTABLE (SANTOYO-GUTIÉRREZ & TORRES-ALVARADO, 2010).	13
FIGURA 2.7 PRINCIPALES USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA. FUENTE: MODIFICADO DE GEOTHERMAL HEAT PUMP AND HEAT ENGINE SYSTEMS (CHIASSON, 2016).	15
FIGURA 2.8 CONSUMO DE ENERGÍA Y CAPACIDAD INSTALADA PARA USOS DIRECTOS, 2015. FUENTE: DIRECT UTILIZATION OF GEOTHERMAL ENERGY 2015 WORLDWIDE REVIEW (LUND & BOYD, 2016).	16
FIGURA 2.9 USOS FINALES POR SECTOR EN 2014. FUENTE: MODIFICADO DE ENERGY EFFICIENCY INDICATORS (IEA, 2017A).	17
FIGURA 2.10 CONSUMO GLOBAL DE ENERGÍA PARA USO FINAL EN EDIFICIOS, 1990-2060. FUENTE: MODIFICADO DE ENERGY TECHNOLOGY PERSPECTIVES (IEA, 2017)	18
FIGURA 2.11 BIOMASA SÓLIDA EN FORMA DE PELLET. FUENTE: <a href="https://www.santamartainstalaciones.com/estufas-de-pellets/">HTTPS://WWW.SANTAMARTAINSTALACIONES.COM/ESTUFAS-DE-PELLETS/</a>	20
FIGURA 2.12 CALENTADOR SOLAR-TÉRMICO. FUENTE: <a href="http://fmnicoperez965.com/solis-de-mataojo-lavalleja-sera-la-primera-localidad-donde-ute-instalara-colectores-solares-en-viviendas-rurales-de-mevir/">HTTP://FMNICOPEREZ965.COM/SOLIS-DE-MATAOJO-LAVALLEJA-SERA-LA-PRIMERA-LOCALIDAD-DONDE-UTE-INSTALARA-COLECTORES-SOLARES-EN-VIVIENDAS-RURALES-DE-MEVIR/</a>	21
FIGURA 2.13 SISTEMA DE BOMBA DE CALOR. FUENTE: <a href="https://www.clarke-rush.com/wp-content/uploads/2018/02/geothermal-heating-maintenance.jpg">HTTPS://WWW.CLARKE-RUSH.COM/WP-CONTENT/UPLOADS/2018/02/GEOTHERMAL-HEATING-MAINTENANCE.JPG</a>	22
FIGURA 3.1 CICLO TERMODINÁMICO IDEAL DE COMPRESIÓN MECÁNICA DE VAPOR REPRESENTADO EN UN DIAGRAMA PRESIÓN-ENTALPÍA FUENTE: MODIFICADO DE ADVANCES IN GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEMS (REES, 2016).	24
FIGURA 3.2 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UNA BOMBA DE CALOR. FUENTE: MODIFICADO DE GEOTHERMAL ENERGY: RENEWABLE ENERGY AND THE ENVIRONMENT (GLASSLEY, 2010).	25
FIGURA 3.3 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UNA BOMBA DE CALOR. FUENTE: MODIFICADO DE SOLAR-ASSISTED HEAT PUMPS (CHWIEDUK, 2012).	26
FIGURA 3.4 BOMBA DE CALOR. FUENTE: HUNT'S SERVICES <a href="https://www.huntsservices.com/heat-pump/">HTTPS://WWW.HUNTSSERVICES.COM/HEAT-PUMP/</a>	27
FIGURA 3.5 BOMBA DE CALOR FUENTE AIRE. FUENTE: HVAC FUNDAMENTALS (BRUMBAUGH, 2004).	29
FIGURA 3.6 SISTEMA BOMBA DE CALOR FUENTE AGUA. FUENTE RENEWABLE HEATING AND COOLING (IEA 2007).	30

FIGURA 3.7 COMPARACIÓN DEL INCREMENTO DE TEMPERATURA ENTRE UNA BOMBA DE CALOR DE FUENTE AIRE Y UNA FUENTE SUELO. FUENTE: MODIFICADO DE DESIGN AND INSTALLATION OF RESIDENTIAL GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEMS (CGC, 2010).	31
FIGURA 3.8 SISTEMA TÍPICO DE BOMBA DE CALOR FUENTE SUELO. FUENTE: DOMESTIC GROUND SOURCE HEAT PUMPS: DESIGN AND INSTALLATION OF CLOSED-LOOP SYSTEMS (ENERGY-SAVING-TRUST, 2007).	33
FIGURA 3.9 SISTEMAS CERRADOS EN CONFIGURACIÓN HORIZONTAL. FUENTE: GROUND SOURCE HEAT PUMPS SYSTEMS AND APPLICATIONS (MUSTAFA OMER, 2008).	34
FIGURA 3.10 SISTEMA EN CONFIGURACIÓN SLINKY. FUENTE: GEOTHERMAL HEAT PUMP AND HEAT ENGINE SYSTEMS: THEORY AND PRACTICE (CHIASSON, 2016).	35
FIGURA 3.11 SISTEMA EN CONFIGURACIÓN VERTICAL. FUENTE: DESIGN AND INSTALLATION OF RESIDENTIAL GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEMS (CGC, 2010).	35
FIGURA 3.12 DISTRIBUCIÓN DE TEMPEATURAS CON DIFERENTES SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN. FUENTE: RADIANT FLOOR HEATING SYSTEM, TECHNICAL CATALOGUE (STANDARD-HIDRÁULICA).	38
FIGURA 4.1 MODELO DE CICLO DE VIDA EN UNA PERSPECTIVA "DE LA CUNA A LA TUMBA". FUENTE: ADAPTACIÓN DE THE HITCH HIKER'S GUIDE TO LCA (BAUMANN & TILLMAN, 2004) Y SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN PRACTICE (AZAPAGIC, 2010).	40
FIGURA 4.2 NÚMERO DE PUBLICACIONES DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA 1998-2013. FUENTE: GRÁFICA HECHA A PARTIR DE MAPPING THE SCIENTIFIC RESEARCH ON LIFE CYCLE ASSESSMENT: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS (HOU ET AL., 2015).	41
FIGURA 4.3 FASES DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA. FUENTE (ISO, 2006).	42
FIGURA 4.4 FLUJO Y MANEJO DE DATOS DURANTE UN ESTUDIO DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. FUENTE: THE HITCH HIKER'S GUIDE TO LCA (BAUMANN & TILLMAN, 2004).	47
FIGURA 5.1 BOMBA DE CALOR DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. FUENTE: PROPIA.	56
FIGURA 5.2 CICLO DE VIDA Y LÍMITES DEL SISTEMA PARA EL CASO DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	59
FIGURA 5.3 CONTRIBUCIÓN DE LAS ETAPAS DEL SISTEMA AL TOTAL DE IMPACTOS, NORMALIZADOS A LA UNIDAD FUNCIONAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	69
FIGURA 5.4 POTENCIAL DE AGOTAMIENTO DE RECURSOS ABIÓTICOS (ADP ELEMENTOS). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	70
FIGURA 5.5 POTENCIAL DE AGOTAMIENTO DE RECURSOS ABIÓTICOS (ADP FÓSIL). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	71
FIGURA 5.6 POTENCIAL DE ACIDIFICACIÓN (AP). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	72
FIGURA 5.7 POTENCIAL DE EUTROFIZACIÓN (EP). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	72
FIGURA 5.8 POTENCIAL DE ECOTOXICIDAD ACUÁTICA DE AGUA DULCE (FAETP). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	73
FIGURA 5.9 POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	74
FIGURA 5.10 POTENCIAL DE TOXICIDAD HUMANA (HTP). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	74
FIGURA 5.11 POTENCIAL DE ECOTOXICIDAD ACUÁTICA MARINA (MAETP). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	75
FIGURA 5.12 POTENCIAL DE AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO (ODP). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	76
FIGURA 5.13 POTENCIAL DE CREACIÓN DE OZONO FOTOQUÍMICO (POCP). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	76
FIGURA 5.14 POTENCIAL DE ECOTOXICIDAD TERRESTRE (TETP). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	77

FIGURA 5.15 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE TUBERÍAS, FASE DE INSTALACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	80
FIGURA 5.16 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE TUBERÍAS, MANUFACTURA DE TUBERÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	81
FIGURA 5.17 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE TUBERÍAS, MATERIAS PRIMAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	82
FIGURA 5.18 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA FUENTE ENERGÉTICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	84

## Índice de tablas

TABLA 1 CAPACIDAD INSTALADA Y CONSUMO ENERGÉTICO DE LAS BOMBAS DE CALOR A NIVEL MUNDIAL (LUND & BOYD, 2016). .....	22
TABLA 2 ESTUDIOS DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA BOMBAS DE CALOR FUENTE SUELO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	53
TABLA 3 FACTOR DE CONVERSIÓN PARA UNIDAD FUNCIONAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	61
TABLA 4 MATERIALES PARA MANUFACTURA DE LA BOMBA DE CALOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE INFORMACIÓN DE (GOODMAN, 2013; RUBALCABA, 2017). ....	62
TABLA 5 MANUFACTURA DE LA BOMBA DE CALOR. FUENTE: DOMESTIC HEAT PUMPS: LIFE CYCLE ENVIRONMENTAL IMPACTS AND POTENTIAL IMPLICATIONS FOR THE UK (GREENING & AZAPAGIC, 2012).....	62
TABLA 6 MATERIALES PARA MANUFACTURA DE TUBERÍAS, CASO BASE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	63
TABLA 7 ENERGÍA PARA MANUFACTURA DE TUBERÍAS, CASO BASE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE ESTIMATE OF ENERGY CONSUMPTION AND CO2 EMISSION ASSOCIATED WITH THE PRODUCTION, USE AND FINAL DISPOSAL OF PVC, HDPE, PP, DUCTILE IRON AND CONCRETE PIPES (BALDASANO, JÍMENEZ, & PARRA, 2005). ....	63
TABLA 8 MATERIALES PARA MANUFACTURA DE TUBERÍAS, ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE TUBERÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	63
TABLA 9 ENERGÍA PARA MANUFACTURA DE TUBERÍAS, ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE TUBERÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE ESTIMATE OF ENERGY CONSUMPTION AND CO <sub>2</sub> EMISSION ASSOCIATED WITH THE PRODUCTION, USE AND FINAL DISPOSAL OF PVC, HDPE, PP, DUCTILE IRON AND CONCRETE PIPES (BALDASANO ET AL., 2005). ....	64
TABLA 10 TRANSPORTE DEL SISTEMA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	64
TABLA 11 CONSUMO ENERGÉTICO PARA LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA, CASO BASE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	64
TABLA 12 FLUIDO DE TRABAJO PARA EL SISTEMA, CASO BASE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	65
TABLA 13 CONSUMO ENERGÉTICO PARA LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA, ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE TUBERÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	65
TABLA 14 FLUIDO DE TRABAJO PARA EL SISTEMA, ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE TUBERÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	65
TABLA 15 OPERACIÓN DEL SISTEMA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	65
TABLA 16 MATERIALES PARA MANTENIMIENTO DEL SISTEMA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	66
TABLA 17 EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES PARA EL CASO BASE, NORMALIZADOS A LA UNIDAD FUNCIONAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	68
TABLA 18 COMPARACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES PARA EL CASO BASE Y EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE TUBERÍAS, NORMALIZADOS A LA UNIDAD FUNCIONAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	79
TABLA 19 COMPARACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES PARA EL CASO BASE Y EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA FUENTE ENERGÉTICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	83

## **Glosario**

ACV – Análisis de ciclo de vida

ADP – Potencial de agotamiento de recursos abióticos: Abiotic resource depletion

AI – Acero inoxidable

ASFE – Análisis de sensibilidad para la fuente energética

AST – Análisis de sensibilidad de tuberías

AP – Potencial de acidificación: Acidification potential

BC – Bomba de calor

CB – Caso base

CML – Centro de Ciencias Medio Ambientales: Center of Environmental Science

CMNUCC – Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

CNUDS – Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible

CNUMAD – Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo

COP – Coeficiente de desempeño: Coefficient of performance

EE – Eficiencia Energética

EER – Radio de eficiencia energética: Energy efficiency ratio

EFL – Equivalente de carga completa: Equivalent full load

EICV – Evaluación del impacto del ciclo de vida

EP – Potencial de eutrofización: Eutrophication potential

ER – Energía renovable

FAETP – Potencial de ecotoxicidad acuático de agua dulce: Feshwater aquatic ecotoxicity potential

GaBi® – Balance holístico (Ganzheitlichen Bilanzierung)

GEI – Gases de efecto invernadero

GSHPA – Asociación de Bombas de Calor Fuente Suelo: Ground Souce Heat Pump Association

GWP – Potencial de calentamiento global: Global warming potential

HDPE – Polietileno de alta densidad: High density polyethylene

HTP – Potencial de toxicidad humana: Human toxicity potential

IEA – Agencia Internacional de Energía: International Energy Agency

IPCC – Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: Intergovernmental Panel on Climate Change

IRENA – Agencia Internacional de Energía Renovable: International Renewable Energy Agency

LGCC – Ley General de Cambio Climático

LTE – Ley de Transición Energética

MAETP – Potencial de ecotoxicidad acuático marino: Marine aquatic ecotoxicity potential

MSF – Módulo solar fotovoltaico

ODP – Potencial de agotamiento de la capa de ozono: Ozone layer depletion potential

ODS – Objetivos de Desarrollo Sostenible

POCP – Potencial de oxidación fotoquímica: Photochemical oxidant formation potential

PVC – Policloruro de vinilo

REN21 – Red de Políticas en Energía Renovable para el Siglo 21: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century

RGSBE – Recursos geotérmicos superficiales de baja entalpía

SENER – Secretaría de Energía

SETAC – Sociedad de Toxicología y Química del Medio Ambiente: Society of Environmental Toxicology and Chemistry

TETP – Potencial de ecotoxicidad terrestre: Terrestrial ecotoxicity potential

TRCE – Tecnologías renovables para el calentamiento y enfriamiento

UF – Unidad funcional

UN – Naciones Unidas: United Nations

UNEP – Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente: United Nations Environment Programme

UNESCO – Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura: The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

WBCSD – Consejo Mundial de Negocios para el Desarrollo Sostenible: World Business Council for Sustainable Development

## **Objetivo general**

Evaluar el desempeño ambiental de una bomba de calor con intercambio de calor térmico con el subsuelo, haciendo uso de la metodología del análisis de ciclo de vida, con la finalidad de identificar los mayores impactos ambientales durante su fabricación, uso y disposición final.

## **Objetivos particulares**

- Identificar la opción técnica más viable durante la construcción del sistema de intercambio de calor
- Encontrar la etapa del ciclo de vida que representa los mayores impactos ambientales
- Comparar las categorías de impacto que ocurren al variar la fuente de generación de energía eléctrica para el sistema

# 1 Introducción

El crecimiento de la población, sus mejoras económicas y la necesidad energética para el desarrollo industrial, así como la necesidad de habitar espacios térmicamente confortantes, han acelerado el fenómeno que conocemos como cambio climático. Con el propósito de mitigar el cambio climático y reducir la demanda energética, se han establecido diversos acuerdos y compromisos, con la intención de mantener el incremento de la temperatura media global por debajo de los 2°C a través de la promoción, desarrollo e implementación de tecnologías que permitan generar y aprovechar, de manera sostenible y eficiente, diferentes fuentes de energía (UN, 2015).

El sector residencial contribuye con alrededor del 8% (10 GtCO<sub>2</sub>) de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> (IEA, 2018) y de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) (2017) se consumen 12,5 EJ durante la climatización de espacios cerrados. En el caso de México, se han establecido metas para reducir en un 18% las emisiones del sector comercial y residencial (DOF, 2018).

Actualmente existen tecnologías maduras y de fácil acceso que nos permiten aprovechar energías renovables (ER) como los recursos geotérmicos superficiales de baja entalpía (RGSBE), mediante bombas de calor (BC) que desplazan grandes cantidades de calor entre una edificación y el subsuelo, a través de procesos termodinámicos simples que permiten calentar y enfriar espacios cerrados.

El gran desempeño y eficiencia que presenta una BC conectada al subsuelo, puede disminuir el consumo energético y las emisiones asociadas al sector residencial, sin embargo, ocurren una serie de impactos ambientales durante la manufactura, operación y disposición final del dispositivo. El análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología que nos permite cuantificar las cargas ambientales que derivan del desarrollo de productos y servicios, al considerar los diferentes impactos que se generan durante su vida útil.

De acuerdo con el *“Mapa de Ruta Tecnológica: Usos Directos del Calor Geotérmico”* (SENER, 2018), se espera en los próximos años un despliegue tecnológico para el

aprovechamiento de RGSBE a nivel nacional. Ruiz-Mercado (2012), menciona que el proceso de toma de decisiones se debe llevar a cabo bajo un marco de referencia que establezca indicadores que evalúen el efecto positivo y negativo que puedan llegar a tener los proyectos tecnológicos, considerando los intereses de la comunidad, la viabilidad técnica y económica, así como los riesgos a la salud y medio ambiente.

El presente estudio evalúa los impactos ambientales generados durante la satisfacción del confort térmico en una vivienda típica de México, haciendo uso de la metodología del ACV para identificar las principales cargas ambientales asociadas a un sistema de BC con aprovechamiento de RGSBE. A través de la generación de escenarios, se busca facilitar la toma de decisiones durante la implementación de proyectos de despliegue tecnológico, al contar con información que permita seleccionar la alternativa que contenga las menores implicaciones ambientales.

## **2 Marco global en sostenibilidad energética**

Asegurar el suministro de energía que requiere la población mundial debido a su constante crecimiento y sus actividades económicas, ha impulsado la innovación tecnológica que permita satisfacer la demanda energética global y de manera simultánea ayude a combatir el cambio climático.

El uso de ER para el acondicionamiento de espacios, calentamiento y enfriamiento de procesos industriales es posible gracias al desarrollo tecnológico que aprovecha de manera eficiente y sostenible energías como la solar-térmica, bioenergéticos y RGSBE que sustituyen a las fuentes convencionales de generación de calor como el gas y carbón, así como los equipos de enfriamiento poco eficientes que dominan el mercado.

A lo largo de este capítulo se abordan temas en materia de energía, desarrollo tecnológico y cambio climático, haciendo énfasis en el uso eficiente de la energía y el aprovechamiento de ER para climatización.

### **2.1 Cambio climático**

El clima terrestre es producto de la constante y compleja interacción entre la atmósfera, los océanos, las capas de hielo, las masas continentales y en general con la vida del planeta (Conde, 2011). El clima puede definirse como el estado del tiempo (condición temporal) promedio, su variabilidad en un periodo y región geográfica determinada.

De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (1995), la estabilidad climática predomina cuando existe un equilibrio entre la energía solar que ingresa en forma de radiación, la cual es absorbida principalmente en la superficie terrestre, distribuida por la atmósfera, océanos e irradiada de vuelta al espacio. Este mecanismo permite que la Tierra en su totalidad se encuentre en un equilibrio energético pero los factores antropógenos

disminuyen la eficiencia con la que la tierra emite radiación al exterior a causa del forzamiento radiativo<sup>1</sup>.

El cambio climático es un tema que ha cobrado mayor relevancia en los últimos años debido al calentamiento o incremento en la temperatura media de la Tierra. Históricamente nuestro planeta ha sufrido cambios climáticos desde hace miles de años de manera natural o por interacciones directas entre sus componentes climáticos. Un ejemplo de cambio climático por eventos naturales es el vulcanismo pues con las cenizas que se desprenden, ocurren cambios en la composición atmosférica que dan lugar a las alteraciones climáticas (IPCC, 1995). Sin embargo, este proceso se ha presentado de manera acelerada desde el año 1950, periodo en el que la actividad humana es la que contribuye en gran medida a la emisión continua de gases de efecto invernadero (GEI) debido a las actividades económicas que desempeña el hombre y su desarrollo industrial (ver Figura 2.1), de hecho las Naciones Unidas (UN, por sus siglas en inglés) (1992) definen el cambio climático como “el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos comprobables”.

Los análisis presentados en el “*Quinto Informe de Evaluación*” del IPCC (2014), muestran que de 1880 a 2012 la temperatura media mundial aumentó 0.85°C, haciendo que la comunidad internacional establezca las acciones, acuerdos y medidas necesarias para lograr la mitigación del cambio climático en el corto, mediano y largo plazo.

---

<sup>1</sup> El forzamiento radiativo es el cambio neto en el balance energético de la Tierra debido a una perturbación (IPCC, 2013)

## Emisiones antropógenas anuales de gases de efecto invernadero totales por grupos de gases, 1970-2010

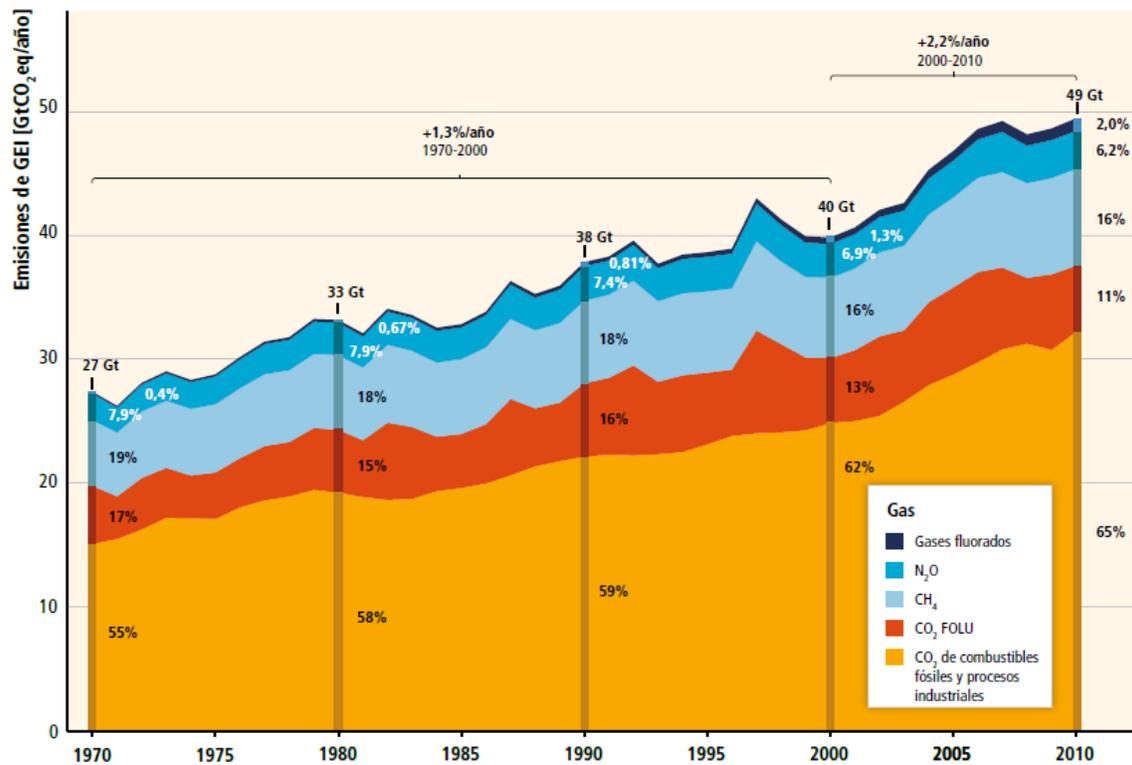


Figura 2.1 Emisiones antropógenas anuales de gases de efecto invernadero totales por grupos de gases, 1970-2010. Fuente: Cambio Climático 2014: Mitigación del cambio climático, Resumen para responsables de políticas (IPCC, 2014).

## 2.2 Acciones por el cambio climático

Las condiciones climáticas que se han presentado en la actualidad ponen en riesgo la vida de millones de personas, comprometiendo la seguridad alimentaria y el acceso a servicios como el agua y electricidad, elementos básicos y esenciales para el desarrollo de la sociedad.

Desde 1992, se establecieron una serie de principios durante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) con el objetivo de reducir los impactos generados al medio ambiente como el calentamiento de la atmósfera, deforestación, contaminación de efluentes y cambios de uso de suelo.

Con esto se logró un primer acuerdo internacional denominado “*Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*”, documento capaz de proteger la integridad del sistema ambiental, al destacar la protección del medio ambiente como parte integral del desarrollo mundial (UN, 1992).

Un segundo esfuerzo llevado a cabo durante la CMNUCC de 1995, fue la creación del “*Protocolo de Kyoto*” con la intención de fortalecer la respuesta global al cambio climático, a través de compromisos adoptados por los países más desarrollados al elaborar y aplicar políticas y programas conforme a sus circunstancias nacionales, fomentando la eficiencia energética, investigación, promoción y aumento del uso de formas nuevas de energía como las ER (UN, 1995).

A pesar de los compromisos adquiridos en 1995, las emisiones de GEI siguieron a la alza (ver Figura 2.1) y el calentamiento global se hizo cada vez más notorio, ante tal situación, los Estados Miembros adoptaron un nuevo instrumento jurídico denominado “*Acuerdo de París*”, en la celebración de la 21ª Conferencia de París (COP21) en 2015, con el objetivo de mantener el incremento de la temperatura media global por debajo de los 2°C a finales del siglo XXI (Sarlát, 2017). El Acuerdo de París agrupa a todas las naciones bajo una causa común: realizar esfuerzos ambiciosos para mitigar y adaptarse al cambio climático a través de la cooperación internacional para que los países en vías de desarrollo fortalezcan sus capacidades económicas, humanas y técnicas, incentivando la adopción de nuevas tecnologías que reduzcan las emisiones de GEI al mismo tiempo que se promueve la innovación y el crecimiento económico sostenible (UN, 2015).

Derivado de la COP 21, se lanzó la iniciativa de *Mission Innovation*, en la que 23 países y la Unión Europea buscan duplicar la inversión pública en investigación y desarrollo de energías limpias. Gracias a esto, se han establecido grupos de colaboración científica que intercambian información y transfieren tecnología para innovar en las categorías de: redes inteligentes; generación distribuida; captura de carbono; bioenergéticos; conversión de energía solar; materiales de energías limpias; climatización de interiores y; celdas de hidrógeno.

## 2.3 Desarrollo sostenible

En septiembre de 2015, durante la Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (CNUDS), se establecieron una serie de objetivos ambientales, económicos y sociales en el documento “*Transformar a Nuestro Mundo: Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*” que indica los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), con el propósito de garantizar la preservación del planeta bajo condiciones de igualdad y prosperidad (UN, 2015).

### Objetivos de Desarrollo Sostenible

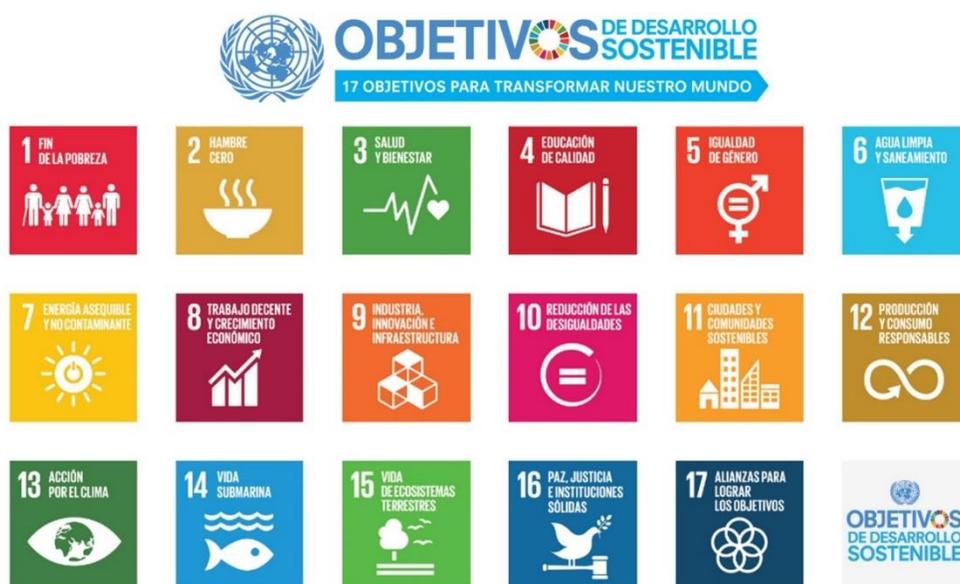


Figura 2.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: Transformar a Nuestro Mundo: Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (UN,2015).

El desarrollo sostenible se define como “la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (UN, 1987) y la Agenda 2030 establece medidas audaces y transformativas que se necesitan urgentemente para conducir al mundo hacia la sostenibilidad y resiliencia, teniendo en cuenta las realidades y capacidades nacionales de cada uno de los Estados Miembros de las UN mediante

la integración de los ODS y metas universales que invitan al mundo entero a establecer políticas bajo las dimensiones económicas, sociales y ambientales.

El ODS 7 “*Energía asequible y no contaminante*”, busca garantizar el acceso universal a la electricidad, expandir la infraestructura existente, incrementar la eficiencia energética (EE) y promover el uso de ER, estimulando el crecimiento económico mientras se protege al medioambiente.

Incrementar el desempeño o eficiencia de las nuevas tecnologías se traduce en una reducción del consumo de recursos materiales y energéticos, disminuyendo así los impactos ambientales derivados de las actividades económicas a través de su ciclo de vida, en otras palabras, durante el desarrollo, implementación, uso y disposición final de las nuevas tecnologías.

## **2.4 Generación de electricidad**

Establecer una visión sostenible con crecimiento económico, equidad social y mitigación del cambio climático más allá del año 2030, indica que será necesario el desarrollo, acceso y difusión de nuevas tecnologías con bajas emisiones de carbono a manera que se sustituyan los combustibles fósiles y se migre a un sistema energético que aproveche las distintas ER.

Bajo los escenarios de desarrollo sostenible y nuevas políticas en materia de energía, se plantea que la generación eléctrica estará prácticamente libre de emisiones de CO<sub>2</sub> en el año 2040, contando con una participación de las ER en más del 60% de la matriz energética para la generación de electricidad a nivel mundial (IEA, 2017).

El reporte “*Renewables 2018, Global Status Report*” (REN21, 2018), muestra que para la generación de electricidad a nivel mundial predomina el uso de carbón y combustibles derivados del petróleo en un 73.5%, mientras que las ER se emplean en un 26.5% (ver Figura 2.3), dichos porcentajes indican un incremento del 2% en el uso de ER en comparación con el año anterior (REN21, 2017).

**Participación estimada del uso de energías renovables para la producción global de electricidad, 2017**

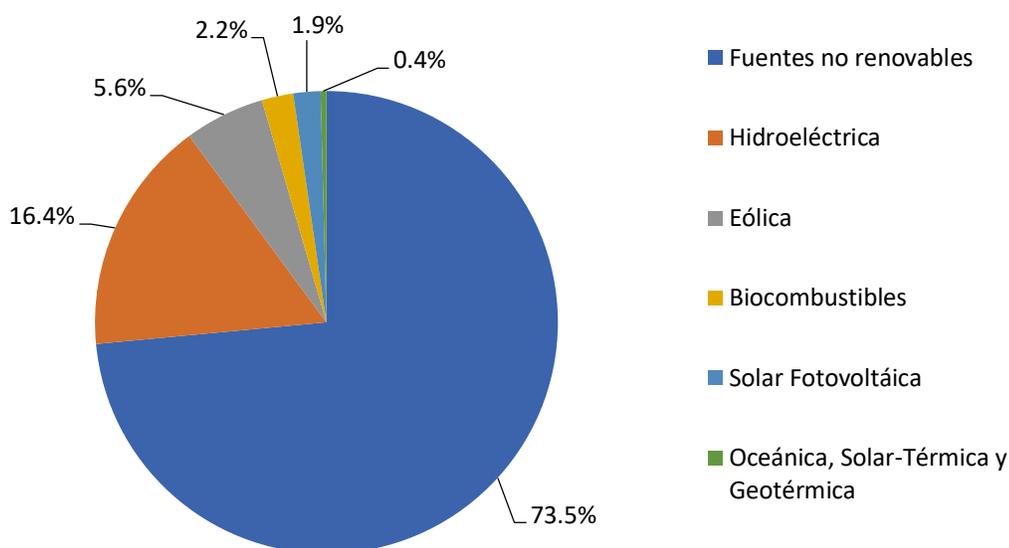


Figura 2.3 Participación estimada del uso de energías renovables para la producción global de electricidad, 2017. Fuente: Modificado de Renewables 2018, Global Status Report (REN21, 2018).

Se estima que la capacidad instalada<sup>2</sup> para la generación renovable de energía pasará de los 1,969 GW reportados en 2015 a 2,795 GW para el año 2021 (IEA, 2016), solamente en 2017 se registró un aumento en la capacidad instalada de 178 GW, dando un total de 2,195 GW en la capacidad instalada a nivel mundial y con una inversión global en 2017 por \$279.8 billones de dólares (REN21, 2018; UNEP, 2018).

Los avances tecnológicos han permitido que los costos asociados al desarrollo e implementación de ER sean cada vez menores, dando cabida a que las economías emergentes o países en vías de desarrollo puedan realizar una transición a energías más limpias que puedan satisfacer su creciente demanda de electricidad.

<sup>2</sup> Capacidad instalada: Potencia nominal o de placa de una unidad generadora, o bien se puede referir a una central, un sistema local o un sistema interconectado (SENER).

## Capacidad global de generación renovable, 2007-2017

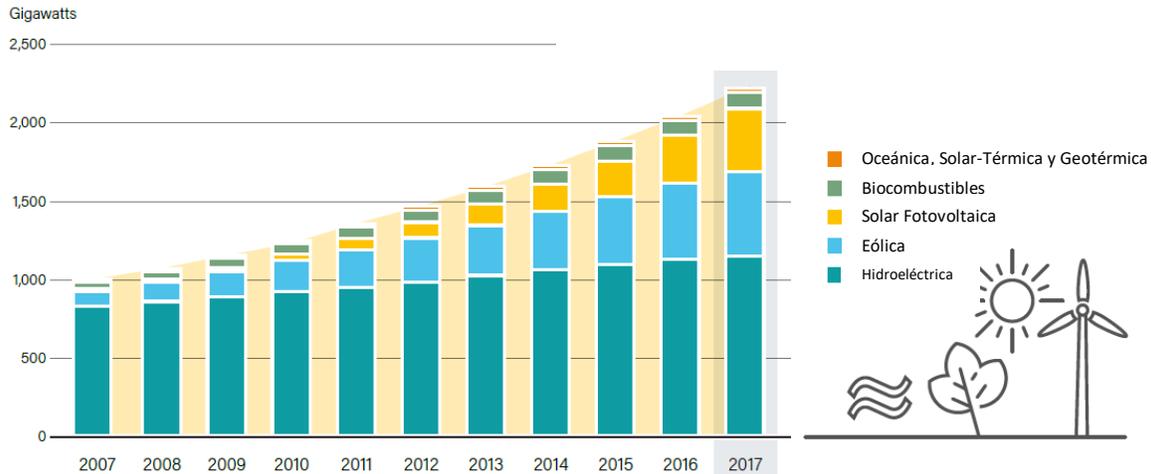


Figura 2.4 Capacidad global de generación renovable, 2007-2017. Fuente: Modificado de Renewables 2018: Global Status Report (REN21, 2018).

La reducción de emisiones, consumo energético e impactos al medio ambiente se puede lograr en un menor tiempo al reducir la demanda energética, implementando nuevas tecnologías para uso final de electricidad y no solamente con la descarbonización de los sistemas de generación eléctrica (Santoyo-Castelazo et al., 2014). Se calcula que alrededor de la mitad del consumo energético final ocurre en la climatización de interiores y procesos industriales, es por eso que la participación de las ER puede incidir directamente en el suministro y ahorro energético mediante la combustión directa de bioenergéticos, aprovechamiento de RGSBE y la energía solar-térmica.

## 2.5 Generación de electricidad y mitigación de gases de efecto invernadero en México

Dentro del contexto nacional, la *“Ley de Transición Energética”* (LTE) (DOF, 2015) establece en su Artículo Tercero Transitorio que la Secretaría de Energía (SENER) fijará las metas de participación de energías limpias durante la generación de energía eléctrica. De acuerdo con la LTE, la *“Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios”* es el instrumento

rector para la planeación al mediano y largo plazo del sector energético para migrar a tecnologías limpias y eficientes que contribuyan a la diversificación de la matriz energética y así, lograr un desarrollo sostenible con energía asequible para la sociedad. La Estrategia fue publicada en 2014 y actualizada en 2016, estableciendo metas de generación de energías limpias del 25% en 2018; 30% al 2021; 35% al 2024; 37.7% al 2030; 40% al 2035 y 50% al 2050 (SENER, 2016)

De acuerdo con el “*Reporte de Avance de Energías Limpias 2018*” (SENER, 2018), la generación por fuentes limpias alcanzó 24.12% (40,499 GWh) respecto al total de energía eléctrica producida (167,893 GWh). La generación de energía limpia se distribuye de la siguiente manera: hidroeléctrica 43%; nuclear 17%; eólica 15%; cogeneración eficiente 12%; geotérmica 7%; bagazo 3%; fotovoltaica 3% y biogás 1%, esto se puede apreciar a continuación en la Figura 2.5.

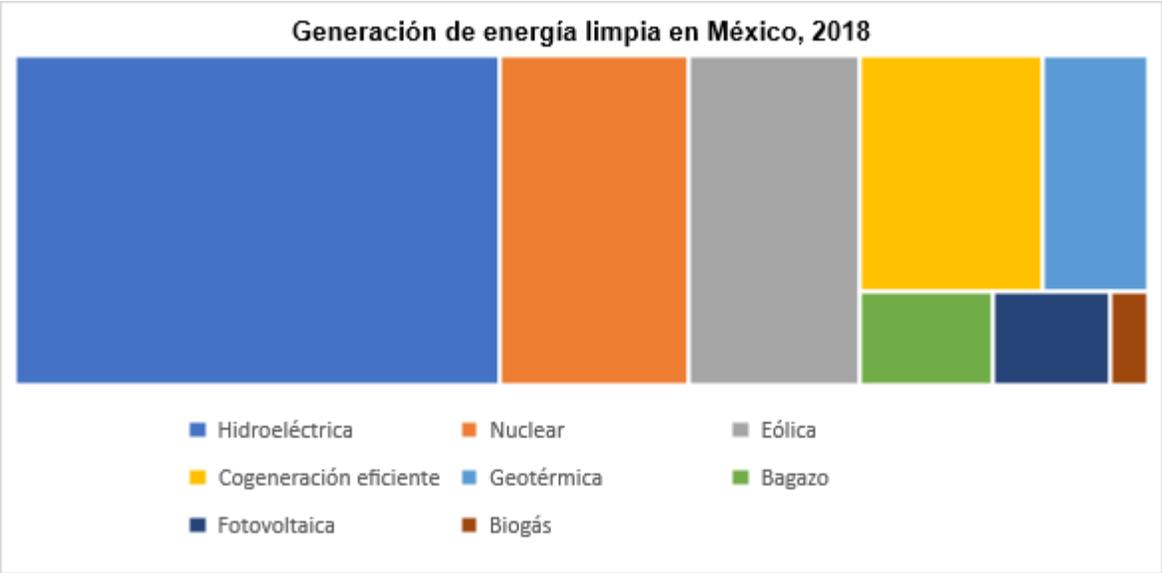


Figura 2.5 Generación de energía limpia en México, 2018. Fuente: Elaboración propia a partir de Reporte de Avance de Energías Limpias Primer Semestre 2018 (SENER, 2018).

Los reportes de energías limpias indican que estamos cerca de cumplir con los mandatos establecidos en la LTE y en este sentido, garantizar el derecho a un medio ambiente sano a través de la migración a una economía baja en carbono. Al igual que la LTE, la “*Ley General de Cambio Climático*” (LGCC) establece en su

Artículo Tercero Transitorio que la generación de energía eléctrica debe basarse en al menos un 35% de energías limpias al 2024, mientras que en su Segundo Transitorio se asume una meta aspiracional de reducir al 2020 el 30% de las emisiones de GEI y un 50% al 2050, esperando una reducción al 2030 del 18% en el sector transporte; 31% durante la generación de electricidad; 18% en el sector comercial y residencial; 14% en petróleo y gas; 5% en la industria; 8% en la agricultura y ganadería y 28% en la gestión de residuos (DOF, 2018). Se ha identificado que las políticas públicas en materia de eficiencia lograron reducir el consumo energético de manera progresiva en un 45.9% para el sector residencial, 15.6% para el sector industrial, 10.9% para el sector comercial y de servicios y 5.6% en el transporte, en un periodo que comprende de 1995 a 2015 (CEPAL, 2018).

Actualmente México se posiciona entre los países que se encuentran preparados y lideran la transición a energías limpias (posición 37 de 115), de acuerdo con el desempeño del sistema energético y bajo las dimensiones de regulación, gobernanza, infraestructura, comercialización, capital humano especializado, estructura del sistema e inversión (WEF, 2019). En 2018, México se unió como miembro de la IEA y tras sus inversiones en investigación, desarrollo y demostración de tecnologías para energía, consiguió que dicho organismo internacional reconociera a México como el décimo país con mayor inversión del gasto público para promover tecnologías bajas en carbono y combustibles más limpios, con una inversión total de \$333 millones de dólares en 2017 (IEA, 2017).

## 2.6 Geotermia

La energía proveniente del interior de la Tierra es conocida como energía geotérmica, la cual es el calor remanente de la formación del planeta debido al decaimiento radioactivo que, por naturaleza, ocurre en los isótopos inestables ubicados al interior de la corteza terrestre y por el movimiento de las placas tectónicas.

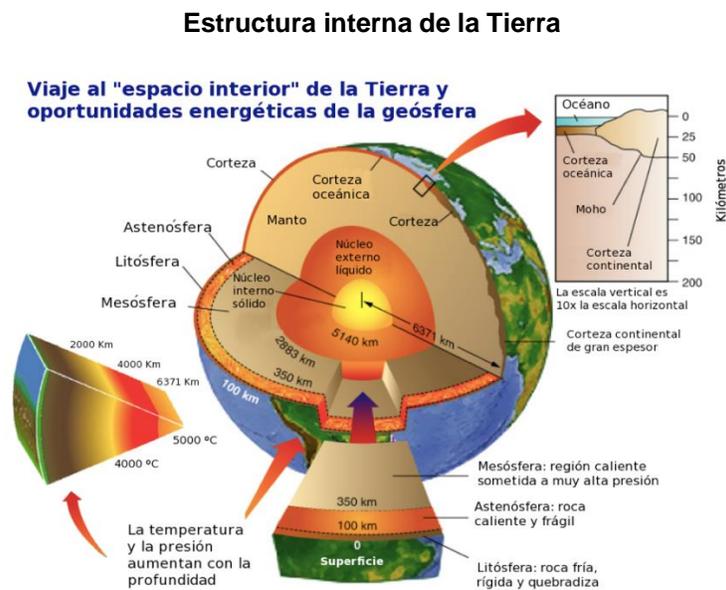


Figura 2.6 Estructura interna de la Tierra. Fuente: Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable (Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010).

La utilización y transporte del calor interno de la corteza terrestre hacia la superficie se realiza a través de rocas y fluidos. Los sistemas geotérmicos se manifiestan e identifican de acuerdo a su naturaleza como sistemas hidrotermales<sup>3</sup>, sistemas de

<sup>3</sup> Sistemas hidrotermales: Fluido que se infiltra en la corteza terrestre, calentado hasta los 500°C por la roca y se manifiesta en la superficie a través de fumarolas, manantiales y geiseres. Generalmente este tipo de sistemas es empleado para la generación de energía eléctrica (Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010).

roca seca caliente<sup>4</sup>, sistemas geopresurizados<sup>5</sup>, sistemas marinos<sup>6</sup> y sistemas magmáticos<sup>7</sup>, los cuales son categorizados de acuerdo a la calidad o temperatura del recurso de la siguiente manera (Glassley, 2010):

- |  |  |
|--|--|
| a) Recursos geotérmicos de alta entalpia     | $T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$                              |
| b) Recursos geotérmicos de mediana entalpia  | $150\text{ }^{\circ}\text{C} < T > 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| c) Recursos geotérmicos de baja entalpia     | $90\text{ }^{\circ}\text{C} < T > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  |
| d) Recursos geotérmicos de muy baja entalpia | $30\text{ }^{\circ}\text{C} < T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$   |

La industria eléctrica habitualmente emplea recursos de alta entalpia para la generación de electricidad debido a la gran ventaja económica que ofrecen, sin embargo, el ciclo binario orgánico de Rankine ofrece la posibilidad de aprovechar recursos que se encuentran incluso debajo de los 90°C.

Las plantas de energía geotérmica proporcionan un rendimiento de producción estable que no se ve afectado por las variaciones climáticas, resultando en factores de planta que van del 60% al 90%, haciendo que esta fuente de energía sea adecuada para la producción de carga base. En 2017, la generación global de energía geotérmica se estimó en 84.8 TWh, mientras que la capacidad acumulada alcanzó 14 GW, esperando un incremento de 3GW para 2023 (REN21, 2018). En el panorama nacional, la SENER (2018) reportó que en México al 30 de junio de 2018, la energía geotérmica representó el 1.59% de la generación con ER con un total de 2,676 GWh, un 14% por debajo de la generación reportada en el primer semestre de 2017 (2,698 GWh) debido a labores de mantenimiento en el campo geotérmico de Los Azufres, en el Estado de Michoacán.

---

<sup>4</sup> Sistemas de roca caliente: Disponibilidad de calor en ausencia de fluidos, haciendo necesario la perforación de un pozo, inyectando y circulando agua a través de un circuito cerrado ubicado entre 2 y 4 kilómetros de profundidad (Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010).

<sup>5</sup> Sistemas geopresurizados: Mezcla de agua y metano a una presión de 700 bar y una temperatura entre 90 y 200°C capaz de ofrecer energía térmica, química y mecánica (Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010).

<sup>6</sup> Sistemas marinos: Recursos geotérmicos de alta entalpía (hasta 350°C) existentes en el fondo del mar que se manifiestan como descargas hidrotermales, chimeneas o fumarolas (Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010).

<sup>7</sup> Sistemas magmáticos: Roca fundida asociada con actividad volcánica y los procesos de fusión de roca que ofrecen temperaturas disponibles mayores a los 800°C (Santoyo-Gutiérrez & Torres-Alvarado, 2010).

A continuación, en la Figura 2.7 se muestra la utilización de recursos geotérmicos de acuerdo con su temperatura:

**Principales usos de la energía geotérmica**

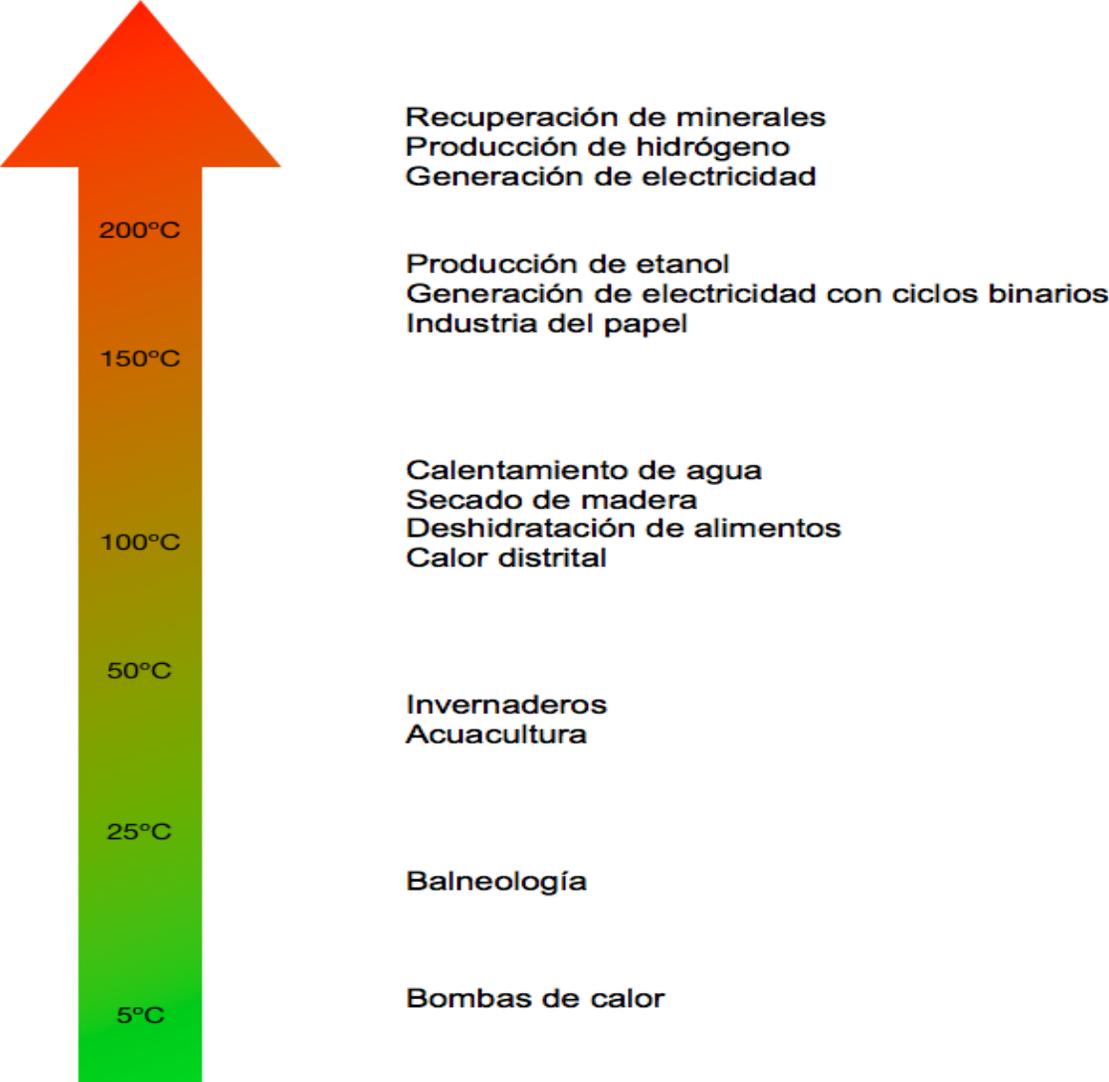


Figura 2.7 Principales usos de la energía geotérmica. Fuente: Modificado de Geothermal Heat Pump and Heat Engine Systems (Chiasson, 2016).

Además de la generación de electricidad, los recursos geotérmicos de mediana, baja y muy baja entalpia son empleados en los que se denominan usos directos para procesos de calentamiento y enfriamiento gracias a que el recurso cumple con la carga térmica necesaria y no se convierte energía eléctrica durante el proceso.

### Consumo de energía y capacidad instalada para usos directos, 2015

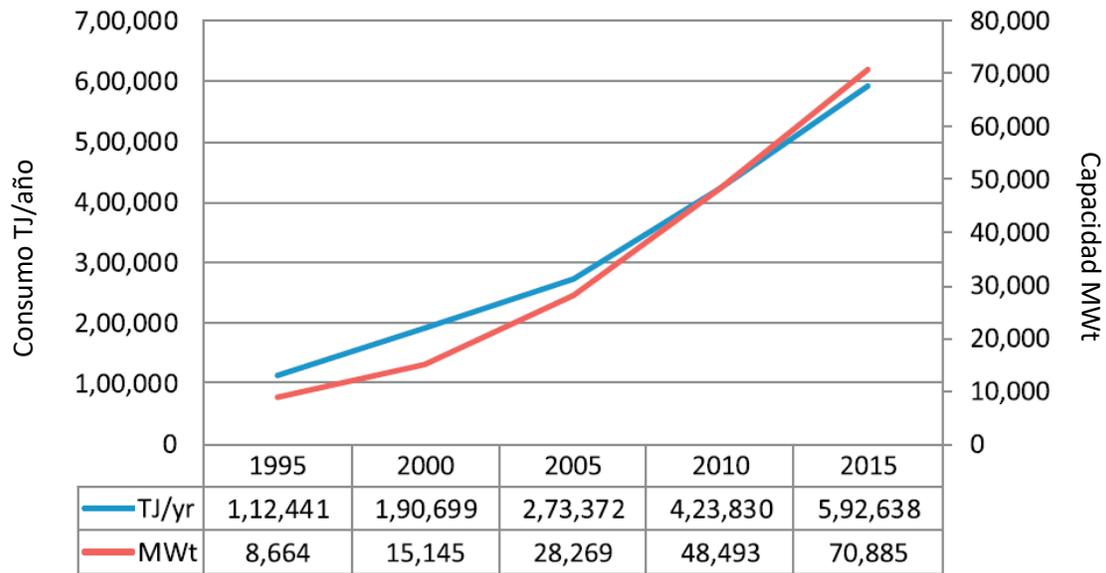


Figura 2.8 Consumo de energía y capacidad instalada para usos directos, 2015. Fuente: Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review (Lund & Boyd, 2016).

Dentro de las aplicaciones más comunes para los usos directos de la geotermia se encuentran la balneología, calentamiento de espacios, calor distrital, invernaderos, acuicultura, procesos industriales y la deshidratación de alimentos. En el caso de las BC se emplean recursos geotérmicos de muy baja entalpia, sin embargo, con esta tecnología se aprovechan las condiciones del suelo superficial para absorber y disipar calor a través de intercambiadores de calor, sin la necesidad de emplear fluido geotérmico como medio de transporte.

## 2.7 Consumo de energía para acondicionamiento de espacios

El estilo de vida, la cultura y las nuevas necesidades de confort térmico, han influenciado el uso de energía y sus emisiones asociadas, siendo el acondicionamiento de interiores uno de los grandes consumidores de energía. La energía suministrada para el sector industrial y de edificaciones comenzó a figurar como un área de atención desde los 90's al contabilizar un 40% del uso final de

energía (IPCC, 1996) y trasladado al año de hoy, se puede notar un incremento del 20% en el consumo energético para procesos industriales, servicios comerciales y residenciales.

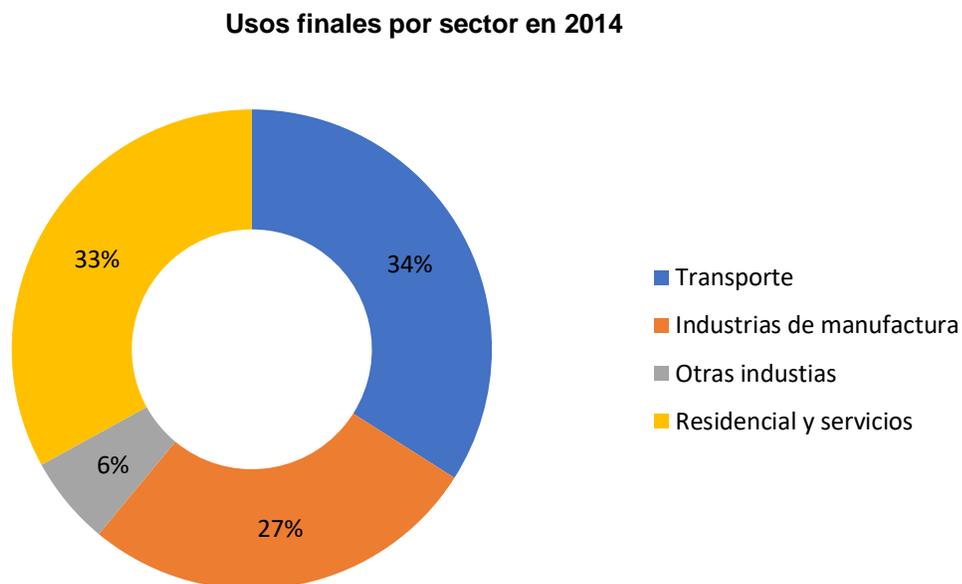


Figura 2.9 Usos finales por sector en 2014. Fuente: Modificado de Energy Efficiency Indicators (IEA, 2017a).

A nivel mundial se emplea una gran cantidad de energía para el calentamiento de espacios en el sector residencial y de servicios debido a las bajas temperaturas a las que un gran número de países se enfrentan. Durante 2017, se reportó que para el sector residencial se utilizó un 51% de la energía suministrada para el calentamiento de espacios (12.5 EJ), contribuyendo con el 8% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> a nivel mundial (10GtCO<sub>2</sub>) (IEA, 2017, 2018). Las proyecciones business-as-usual (BAU)<sup>8</sup> indican que la demanda de energía para el sector residencial se puede duplicar e incrementar del 50-150% sus emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2050, lo anterior, en caso de seguir con nuestras prácticas habituales y la nueva necesidad de confort térmico.

---

<sup>8</sup> Business-as-usual: Proyecciones desarrolladas asumiendo que el futuro seguirá las tendencias del pasado sin cambios ni implementación de políticas (UNEP, 1998).

El acondicionamiento de espacios con ER se ha considerado como el “gigante dormido” por su potencial contribución a la EE, como hemos visto, la atracción principal continúa siendo la generación de electricidad y el uso de combustibles para el transporte (IEA, 2007), esto es de resaltar debido a que la demanda energética para climatización representa gran parte del consumo final total de energía y en los países en vías de desarrollo aún existe poca atención para el uso de tecnologías renovables para el calentamiento y enfriamiento (TRCE) de espacios en comparación con la generación de electricidad, razón por la cual se puede notar un incremento en la demanda energética para el enfriamiento de espacios (ver Figura 2.10), dadas las mejoras en la riqueza mundial, la urbanización y el acceso a servicios.

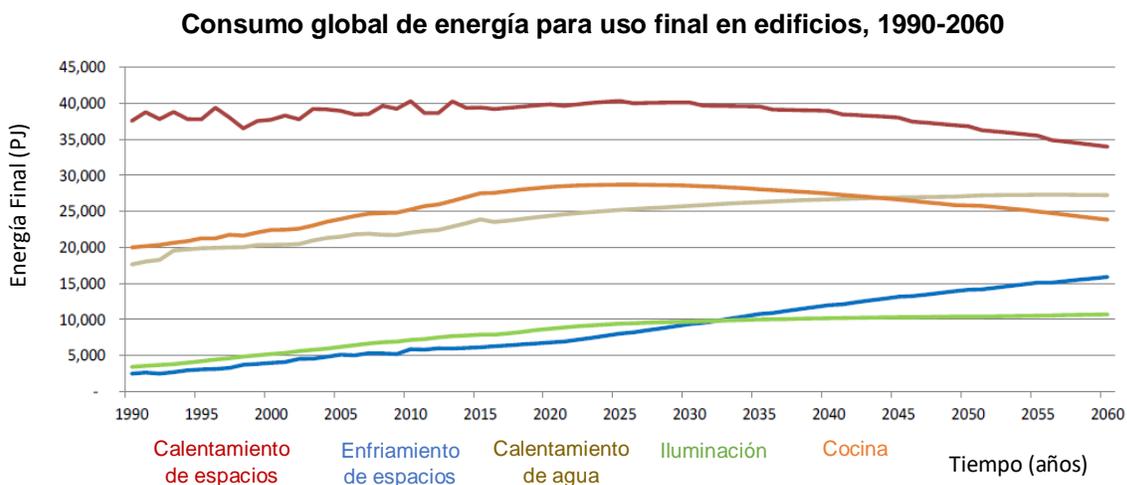


Figura 2.10 Consumo global de energía para uso final en edificios, 1990-2060. Fuente: Modificado de Energy Technology Perspectives (IEA, 2017)

Dentro del contexto nacional, el consumo energético total en 2017 equivale a 5,362.82 PJ (SENER, 2018), siendo el sector transporte el que representa un mayor consumo con un 44% (2,360.16 PJ), por su parte la industria consumió un 35% (1,876.65 PJ), el sector residencial, comercial y público un 17.6% (944.09 PJ) y el agropecuario un 3.5% (181.91 PJ). De acuerdo con la SENER (2018), las principales fuentes de energía dentro del sector residencial, comercial y público provienen de la red eléctrica (34.3%), gas licuado (32.9%), leña (26.5%), gas seco (5.2%) y solar (1%).

## **2.8 Tecnologías renovables para el calentamiento y enfriamiento de espacios**

Se comentó que la generación de electricidad cuenta con una participación de 26.5% de ER, mientras que para los usos finales el sector de edificios contó con una participación del 30% en 2010 (IEA, 2013) y cumplir con el objetivo de limitar el calentamiento global a 2°C requiere una reducción del 77% de emisiones de CO<sub>2</sub> para el sector de edificios para el año 2050. Además de contar con un sector de generación descarbonizado, disminuir de la demanda energética al implementar ER para usos finales, permitirá alcanzar las metas de mitigación y de EE global.

Las TRCE que presentan los mayores avances tecnológicos, accesibilidad, flexibilidad de operación y aprovechamiento de recursos locales son: la bioenergía, la energía solar-térmica y los RGSBE. La IEA plantea escenarios al año 2050 en donde es posible alcanzar una reducción de la demanda energética hasta por 2,000 TWh y ahorros económicos entre los \$70-150 billones de Dólares en la inversión de nueva capacidad para usos finales (IEA, 2007, 2013).

### **2.8.1 Bioenergéticos**

La bioenergía nos ofrece un balance energético neto, esto significa que el CO<sub>2</sub> liberado durante su combustión es el mismo que fue absorbido durante el crecimiento de las plantas al transformar la energía del Sol en carbono, proceso de fotosíntesis, es por eso que se define como biomasa cualquier material de origen biológico, excluyendo a los combustibles fósiles, que contenga energía química almacenada capaz de ser empleada a través de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos altamente eficientes para la producción de energía y son categorizados de la siguiente manera:

### Biomasa sólida en forma de pellet



Figura 2.11 Biomasa sólida en forma de pellet. Fuente: <https://www.santamartainstalaciones.com/estufas-de-pellets/>

- Biomasa sólida, uso tradicional: Residuos sólidos que provienen de la pirolisis de madera (carbón vegetal) y de materia orgánica como semillas y pastos que son comprimidos (pellets).
- Biocombustibles líquidos: Combustibles líquidos que se obtienen a partir de productos agrícolas y se clasifican principalmente en dos categorías:
  - Biodiésel: Producto derivado de la transformación de materia orgánica mediante un tratamiento químico de aceites y grasas vegetales como la soya, aceite de palma y aceite de cocina para producir ésteres metílicos conocidos como biodiésel.
  - Bioetanol: Producto derivado de la fermentación y destilación de materias primas ricas en almidones como los granos, tubérculos y azúcar como la caña y celulosa.
- Biogás: Gas compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), producido por la digestión de la materia orgánica.

La biomasa tiene aplicaciones para la cocción de alimentos, generación de electricidad y de calor, todo esto es posible gracias al desarrollo tecnológico en calentadores y estufas capaces de emplear biocombustibles. La energía disponible para la combustión es de 20MJ/kg para la biomasa sólida, 39.4 MJ/kg para los biocombustibles líquidos y 22.5 MJ/m<sup>3</sup> para biogás (IEA, 2007).

## 2.8.2 Energía solar-térmica

Los calentadores solares térmicos convierten la radiación solar en energía térmica al transferir calor a través de un colector que presenta pérdidas mínimas de calor al ambiente, permitiendo el calentamiento de agua y aire principalmente en edificios, la agricultura y pequeños procesos industriales. La energía solar-térmica es aprovechada con los calentadores solares-térmicos, los cuales son una tecnología madura, confiable y de bajo costo que se encuentra disponible en el mercado desde hace más de treinta años.

**Calentador solar-térmico**



Figura 2.12 Calentador solar-térmico. Fuente: <http://fmnicoperez965.com/solis-de-mataojo-lavalleja-sera-la-primer-localidad-donde-ute-instalara-colectores-solares-en-viviendas-rurales-de-mevir/>

El uso potencial para esta tecnología ocurre en el proceso denominado *active heating* que consiste en circular agua o algún otro fluido a través de un ducto que transfiere la radiación solar a lo largo de un panel que contiene al fluido y la cantidad de energía calorífica capturada por estos dispositivos ronda entre los 300 – 800 kWh/m<sup>2</sup>-año (IEA, 2007).

## 2.8.3 Recursos geotérmicos superficiales de baja entalpía

Los RGSBE se consideran una fuente inagotable de energía, disponible en una gran extensión global a una profundidad mayor a los 2m y menor a los 300m de la corteza terrestre, sitio en el que la temperatura oscila entre los 5° y 21°C durante todo el año

(WEC, 2016). El calor superficial proveniente de la radiación solar es retenido en la corteza terrestre gracias a las características térmicas del suelo como su baja conductividad térmica y su gran capacidad calorífica que permite el almacenamiento de calor.

#### Sistema de bomba de calor



Figura 2.13 Sistema de bomba de calor. Fuente: <https://www.clarke-rush.com/wp-content/uploads/2018/02/geothermal-heating-maintenance.jpg>

Los RGSBE son aprovechados de manera eficiente a través de BC, las cuales presentan un despliegue tecnológico acelerado y contribuyen en gran medida al uso directo de la geotermia. En la Tabla 1 se muestra el uso de energía y la capacidad instalada para las BC a nivel mundial (Lund & Boyd, 2016):

**Tabla 1 Capacidad instalada y consumo energético de las bombas de calor a nivel mundial (Lund & Boyd, 2016).**

Año	2015	2010	2005	2000	1995
Capacidad instalada (MWt)	50,258	33,134	15,384	5,275	1,854
Consumo energético (TJ/año)	326,848	200,149	87,503	23,275	14,615

Se puede notar que el uso de BC es cada vez más común dado que la capacidad instalada ha mostrado una tendencia al alza año tras año desde 1995, fecha en la que se inició la promoción del uso de esta tecnología como una medida de eficiencia energética en los países nórdicos.

### **3 Bombas de calor con intercambio de energía térmica con el subsuelo**

Tras comprender la importancia y potencial que tienen las ER en la diversificación de la generación de electricidad y su uso eficiente a partir de las TRCE, el objeto de estudio será el aprovechamiento de los RGSBE empleando una BC que facilita el intercambio de energía térmica entre el subsuelo y el medio ambiente, especialmente en el acondicionamiento de espacios cerrados.

Las condiciones de los RGSBE hacen ideal el calentamiento de espacios en el periodo de invierno y el enfriamiento durante verano, de tal manera que se reduce la demanda energética y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas.

En este capítulo se describe el principio de operación de las BC, sus diferentes fuentes de intercambio de calor y se profundiza en los RGSBE como fuente de Intercambio de Energía Térmica con el Subsuelo.

#### **3.1 Bombas de calor**

Una BC es una máquina térmica que, en esencia, opera con un ciclo de Carnot<sup>9</sup> similar al proceso que utilizan los refrigeradores, capaz de ser operada en procesos de climatización (calentamiento y enfriamiento) gracias a la válvula de cuatro vías que permite invertir el ciclo termodinámico, manteniendo un bajo consumo de energía eléctrica y transfiriendo grandes cantidades de energía térmica.

La gran ventaja que ofrece esta tecnología es su capacidad de desplazar el calor existente mediante principios termodinámicos simples, en este sentido, proveen una solución ideal para satisfacer las demandas energéticas asociadas a la climatización de espacios al transferir calor con diferentes fuentes.

---

<sup>9</sup> El Ciclo de Carnot, descrito por Sadi Carnot en 1820, es un ciclo ideal para equipos de calentamiento y en su caso las bombas de calor, que consta de cuatro procesos termodinámicos reversibles (Chiasson, 2016).

### 3.1.1 Principio de operación de una bomba de calor

Una BC emplea fluidos refrigerantes, aprovechando sus propiedades térmicas para su compresión mecánica a través de un ciclo cerrado de vapor que comprime, condensa, expande y evapora el fluido refrigerante. Las BC se clasifican de acuerdo a su operación, tradicionalmente emplean un ciclo termodinámico reversible, haciendo uso de un compresor que es impulsado por un motor eléctrico (Glassley, 2010). La representación gráfica de un ciclo termodinámico cerrado para un fluido de refrigeración se puede observar en un diagrama de presión-entalpía como el que se muestra en la Figura 3.1 y es descrito a continuación:

**Ciclo termodinámico ideal de compresión mecánica de vapor**

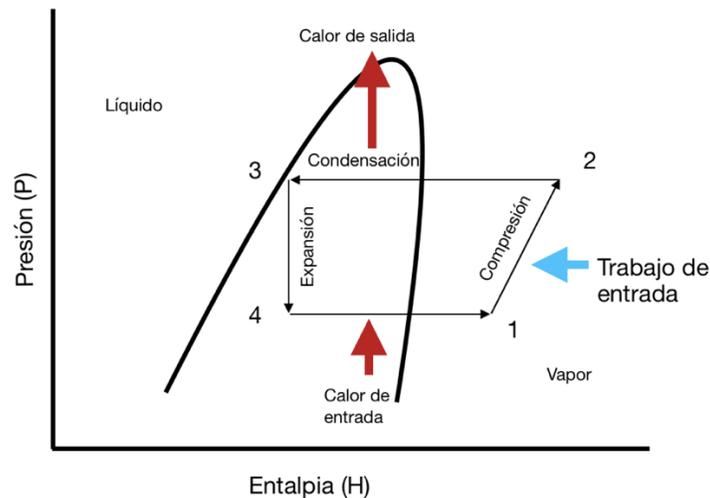


Figura 3.1 Ciclo termodinámico ideal de compresión mecánica de vapor representado en un diagrama presión-entalpía Fuente: Modificado de Advances in Ground Source Heat Pump Systems (Rees, 2016).

1-2 Compresión isoentrópica: El fluido refrigerante en estado de vapor es sobrecalentado gracias a la compresión mecánica que incrementa la presión y temperatura del fluido refrigerante.

2-3 Intercambio de calor a presión constante: Una vez que se cuenta con el vapor sobrecalentado, este entra en contacto con una fuente externa, liberando calor y siendo condensado nuevamente a una presión constante.

3-4 Expansión directa (flash): El fluido refrigerante en estado líquido pasa a través de una válvula de expansión que reduce su presión y temperatura para llevarlo nuevamente a un estado líquido vapor.

4-1 Intercambio de calor a presión constante: En esta etapa el fluido incrementa su temperatura a una presión constante al estar en contacto con una fuente externa de mayor temperatura, pasando del estado líquido-vapor a vapor.

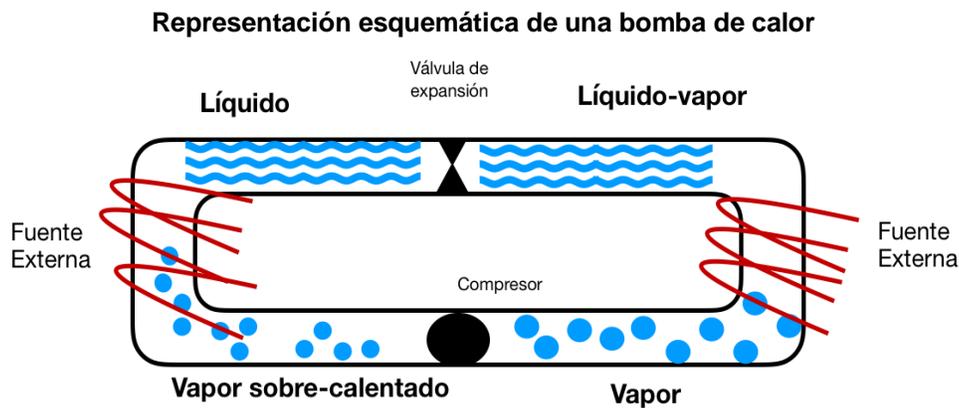


Figura 3.2 Representación esquemática de una bomba de calor. Fuente: Modificado de Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment (Glassley, 2010).

Como una BC opera con un ciclo de refrigeración reversible, hace posible emplear fuentes externas de intercambio de calor dependiendo el uso que se desee, por ejemplo, si se desea calentar un espacio cerrado, dicho espacio es el encargado de disipar el calor a través de un fluido (aire o agua) que se encuentra en contacto con el sistema BC mediante un intercambiador de calor.

### 3.1.2 Desempeño de una bomba de calor

El propósito de las BC es potenciar el calor transferido de una fuente ( $Q_1$ ) de baja temperatura ( $T_1$ ), a un disipador de calor ( $Q_2$ ) de mayor temperatura ( $T_2$ ). Cabe mencionar que el dispositivo mecánico o BC empleada para calentar o enfriar, debe cumplir con la Primera Ley de la Termodinámica<sup>10</sup> al transferir calor del punto  $Q_1$  a

<sup>10</sup> Cualquier sistema termodinámico que se encuentra en un estado de equilibrio posee una variable llamada energía interna. El cambio de energía interna entre dos estados de equilibrio es igual a la diferencia de calor transferido entre el sistema y el trabajo realizado por el mismo. Fuente: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/BGH/thermo1.html>

un disipador de calor, mientras que la BC al recibir trabajo ( $W$ ) durante el proceso, incrementa la transferencia de calor  $Q_2$ , esto se ve reflejado en un aumento de la temperatura de descarga ( $T_2$ ).

**Principio de operación de una bomba de calor**

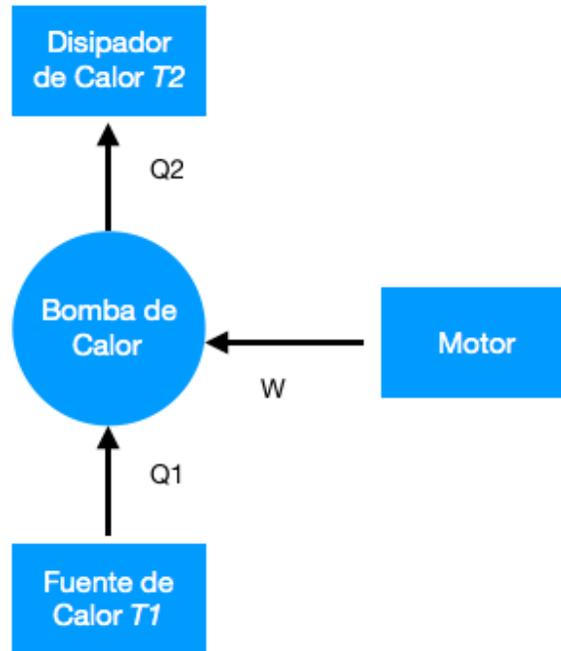


Figura 3.3 Principio de operación de una bomba de calor. Fuente: Modificado de Solar-assisted heat pumps (Chwieduk, 2012).

De acuerdo con el principio de operación de la BC, se han formulado dos índices que miden el desempeño de los procesos de climatización efectuados por la BC, dichos indicadores son el coeficiente de desempeño (COP, por sus siglas en inglés) definido como la relación entre el calor generado por el trabajo ejercido al sistema y el radio de eficiencia energética (EER, por sus siglas en inglés) que se define como la relación entre el consumo de energía eléctrica y la capacidad de enfriar o calentar (CGC, 2010; Reda, 2017).

$$\text{COP} = \frac{Q_2}{|W|} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} \quad (3.1)$$

$$\text{EER} = \frac{|Q_1|}{|W|} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1} = \frac{|Q_2|}{W} - 1$$

(3.2)

A partir de las unidades involucradas en las ecuaciones, se ha encontrado la siguiente relación:

$$\text{EER} = \text{COP} \times 3.412 \quad (3.3)$$

La segunda ley de la termodinámica establece que el calor no puede ser transferido de una fuente de baja temperatura a una de mayor temperatura sin consumir energía, al aplicar este principio a las BC, la ecuación puede ser reformulada de la siguiente manera:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_1}{T_2} - \frac{W}{T_2} = 0 \quad (3.4)$$

Considerando  $T_2$  es mayor que  $T_1$ ,  $W$  debe ser suficientemente grande para equilibrar la suma algebraica. De esa manera, el desempeño de una BC es influenciado por los niveles de temperatura entre la fuente y el disipador de calor. Dado que las BC operan para dos procesos, es necesario definir las variables dependiendo si se emplea en modo calentamiento o enfriamiento.

### 3.1.3 Componentes del sistema mecánico de refrigeración para una bomba de calor

De acuerdo a la bibliografía (Brumbaugh, 2004; CGC, 2010; Grassi, 2018), los componentes principales de una BC pueden ser agrupados en cuatro categorías principales:

#### Bomba de calor



Figura 3.4 Bomba de calor. Fuente: Hunt's Services <https://www.huntsservices.com/heat-pump/>

#### a) Sección de compresión

Esta sección de la BC contiene el compresor o compresores, bobina exterior, ventiladores, motores, caja del sistema de control y válvula de inversión. Además, la sección del compresor también cuenta con un dispositivo de distribución de refrigerante y los controles de descongelación (temporizador automático y termostato de terminación).

#### b) Secciones de intercambio de calor

Para los sistemas de aire, la sección del controlador de aire consiste en la bobina interior, el ventilador y el motor del ventilador, la válvula de retención, la válvula de expansión térmica, el dispositivo de distribución de refrigerante y los filtros de aire.

#### c) Líneas de refrigeración

Las líneas de refrigerante se dividen en una línea de líquido que contiene al refrigerante en estado líquido y una línea de vapor o de succión que lo contiene en estado de vapor. Durante el ciclo de enfriamiento, los vapores fríos del refrigerante se mueven a través de la línea hacia la sección del compresor y durante el ciclo de calentamiento, los vapores calientes se mueven en la dirección opuesta.

#### d) Controles

Los controles de la bomba de calor incluyen el termostato, la válvula de inversión, las válvulas de expansión/retención, los interruptores de seguridad y otros componentes que garantizan un funcionamiento óptimo mientras regulan el flujo del refrigerante.

### **3.2 Tipos de bombas de calor**

Las BC se clasifican de acuerdo con el tipo de fuente empleada y dependiendo de la naturaleza de esta. Para el sector residencial y comercial, existen tres principales sistemas de climatización, los cuales aprovechan el calor que poseen diversas

fuentes externas como el aire, agua y suelo, consideradas como ER y son descritas a continuación.

### 3.2.1 Bombas de calor fuente aire

Este tipo de BC emplea el aire del ambiente como fuente de calor, en este mecanismo el calor es extraído del aire exterior y es transferido hacia el interior del espacio cerrado que se desea climatizar.

Los sistemas *Split* son los más comunes, los cuales se encuentran divididos en dos secciones. La sección que contiene el evaporador y filtro se encuentra en el interior del espacio, por otro lado, la sección que se encuentra fuera del espacio contiene al compresor, condensador y ventilador, todo esto se encuentra interconectado mediante la tubería del fluido refrigerante y el intercambiador de calor.

**Bomba de calor fuente aire**

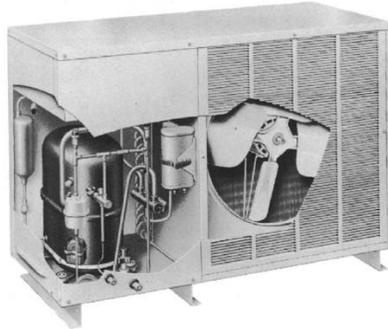


Figura 3.5 Bomba de calor fuente aire. Fuente: HVAC Fundamentals (Brumbaugh, 2004).

Existe un modelo empacado que contiene todos los elementos en una sola sección, es empleado en sistemas de acondicionamiento complejos y son diseñados para satisfacer las demandas energéticas de edificaciones a través de ductos.

Las desventajas para esta fuente es la temperatura del aire, ya que, normalmente el aire se encuentra a una temperatura alta cuando se desea enfriar y a una temperatura baja cuando se desea calentar, es por eso que las BC de fuente aire no son eficientes energéticamente, producen ruido y requieren mantenimiento constante, sin embargo, se han realizado esfuerzos por mejorar el desempeño de

estos sistemas en los últimos treinta años (IEA, 2013). Por otro lado, gran parte del sector residencial cuenta con BC fuente aire instaladas, ya que son sistemas de fácil adquisición, bajo costo y con disponibilidad de piezas de reemplazo.

### 3.2.2 Bombas de calor fuente agua

Es posible emplear agua superficial y subterránea como la que se encuentra disponible en ríos, lagos y en pozos de poca profundidad, utilizando el agua como fuente y medio disipador de calor. Dependiendo del uso, el agua funge como un medio directo para el intercambio de calor.

Los sistemas *Open-loop* o abiertos hacen uso del agua superficial o subterránea extrayendo y reinyectando el fluido a la fuente (río, lago o pozo), una vez que se ha llevado a cabo el proceso de transferencia de calor con el intercambiador que interconecta las tuberías del pozo y el fluido refrigerante dentro de la BC.

**Sistema de bomba de calor fuente agua**

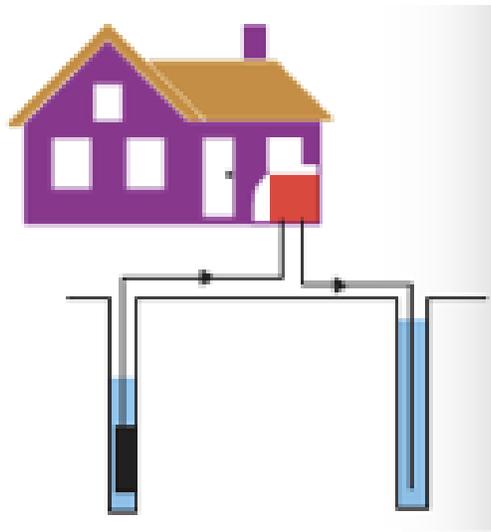


Figura 3.6 Sistema Bomba de calor fuente agua. Fuente Renewable Heating and Cooling (IEA 2007).

La mayor problemática que enfrenta este sistema es la regulación para la descarga del agua después de haber sido extraída, debido a los problemas ambientales que se pueden generar. Aunado a esto, el costo de instalación es demasiado elevado y la carencia de regulación eleva el número de trámites necesarios para poder instalar

este tipo de sistemas. A diferencia de las BC fuente aire, este sistema tiene una mayor eficiencia debido a que la temperatura del agua permanece constante durante diferentes horas del día y en un mayor periodo de tiempo o estación.

### 3.2.3 Bombas de calor fuente suelo

Una BC con intercambio de energía térmica con el subsuelo toma ventaja de la inmensa masa de la Tierra y su moderada temperatura, este proceso es conocido como “geointercambio” y su aplicación térmica más común es a través de una BC fuente suelo (Ground Source Heat Pumps por su traducción al inglés), también conocida como BC geotérmica (Energy-Saving-Trust, 2007; Glassley, 2010; Reda, 2017; WEC, 2016).

**Comparación del incremento de temperatura entre una bomba de calor de fuente aire y suelo**

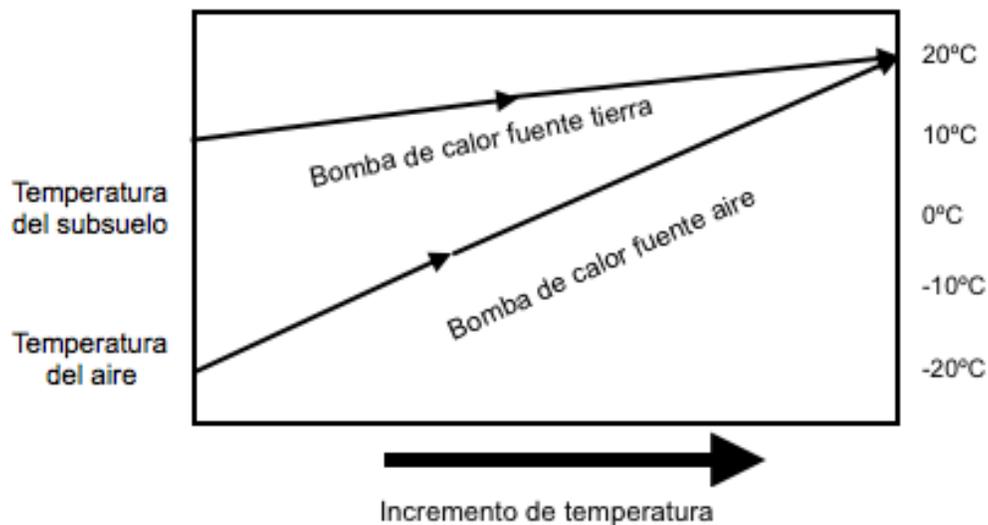


Figura 3.7 Comparación del incremento de temperatura entre una bomba de calor de fuente aire y una fuente suelo. Fuente: Modificado de Design and Installation of Residential Ground Source Heat Pump Systems (CGC, 2010).

### Perfiles de temperatura en la tierra a una profundidad de 15 metros

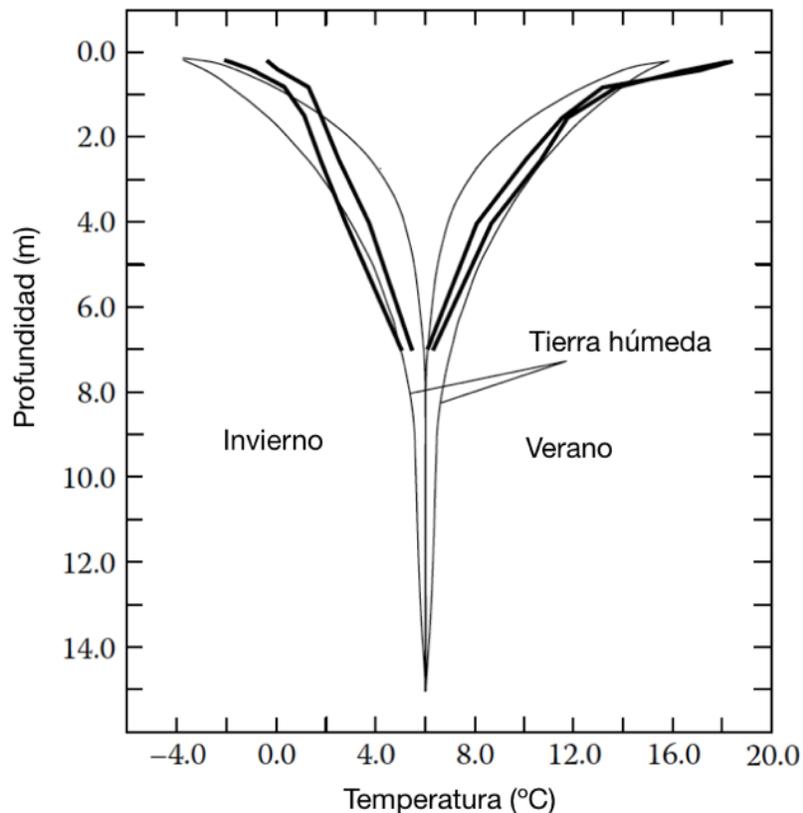


Figura 3.8 Perfiles de temperatura en la tierra a una profundidad de 15 metros, registrada en verano e invierno en el sur de Finlandia en dos años diferentes. Fuente: Modificado de Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment (Glassley, 2010)

Estos sistemas capaces de calentar y enfriar están compuestos principalmente por un intercambiador de calor con los RGSBE o subsuelo, la BC y el sistema de distribución. El intercambiador o colector de calor con el subsuelo es el componente principal dentro del geointercambio, en donde se hace circular continuamente un fluido de trabajo mediante un sistema cerrado o *closed-loop* instalado en el subsuelo. Los fluidos de trabajo más empleados son el agua o una solución de etilenglicol al 30% que circula a través de tubos de polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) o acero inoxidable (AI) en configuraciones verticales u horizontales, transportando así el calor superficial hacia la bomba de calor y viceversa (Chiasson, 2016; Mustafa Omer, 2008).

### Sistema típico de bomba de calor fuente suelo

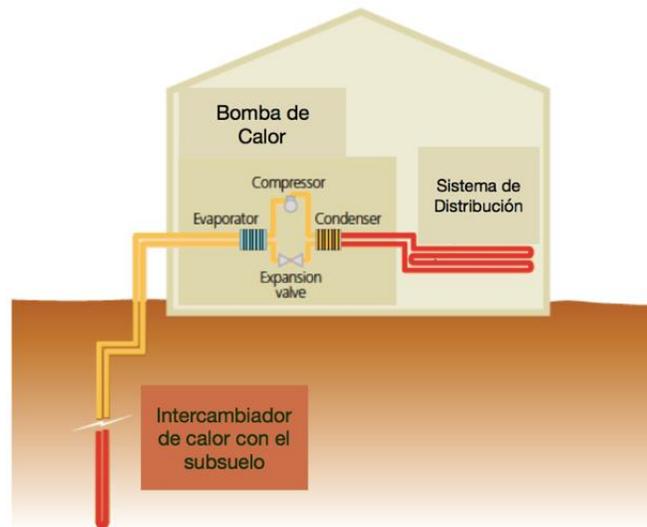


Figura 3.8 Sistema típico de bomba de calor fuente suelo. Fuente: Domestic Ground Source Heat Pumps: Design and Installation of closed-loop systems (Energy-Saving-Trust, 2007).

Una BC fuente suelo eficiente habitualmente tiene valores de COP que oscilan entre valores de 4 y 8, entregando de 3 a 4 kW de calor por kW de energía consumida. El tiempo de vida para la BC es de 20 a 30 años mientras que el intercambiador de calor conectado al subsuelo puede extenderse a 50 años (GSHPA, 2018).

#### a) Configuración horizontal

Gran parte de la carga térmica que brinda esta configuración se debe a la radiación solar que incide en la superficie, por lo que la superficie en donde se encuentra el colector no debe ser cubierta. La configuración horizontal puede ser en serie, paralelo y en trinchera, generalmente estos sistemas se encuentran en jardines, estacionamientos y espacios con suficiente terreno. Los costos asociados no son muy elevados en comparación con excavaciones profundas, sin embargo, algunas de sus desventajas son la gran extensión de terreno necesaria y la variación de temperatura que es influenciada por la estación del año debido a la poca profundidad y características del suelo.

Los sistemas horizontales se encuentran a profundidades mínimas de 1.2m y hasta los 8m, requiriendo aproximadamente entre 40 a 80 m de tubería por kW térmico.

### Sistemas cerrados en configuración horizontal

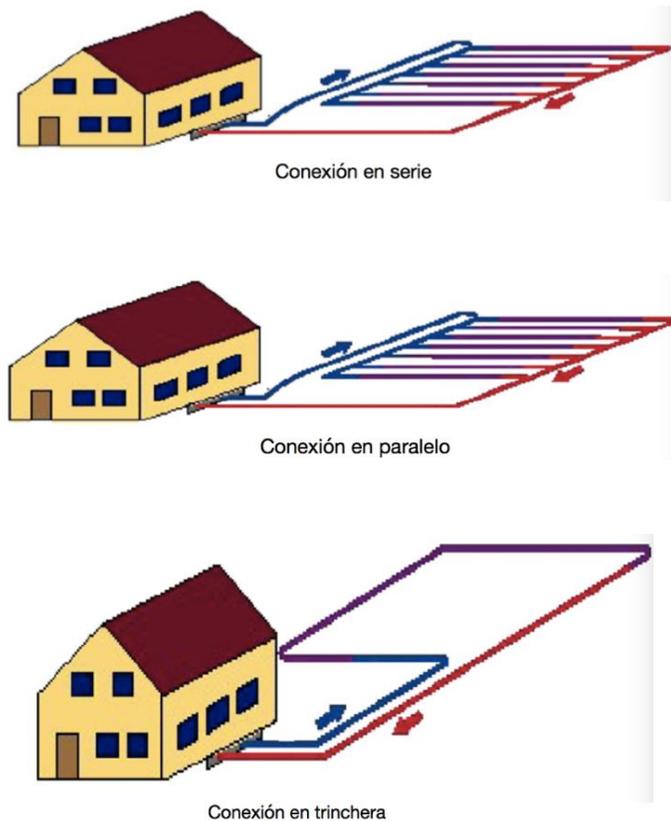


Figura 3.9 Sistemas cerrados en configuración horizontal. Fuente: Ground source heat pumps systems and applications (Mustafa Omer, 2008).

#### b) Configuración en espiral o slinky

Es una variación de la configuración horizontal, la cual consiste en tuberías enrolladas de manera circular dentro de una trinchera, este tipo de configuración requiere una mayor cantidad de tubería, pero ocupa una menor cantidad de superficie en comparación con la configuración horizontal simple, logrando alcanzar una transferencia de calor aproximada de 1 kW térmico por cada 10m de tubería y su principal ventaja es el menor requerimiento de espacio superficial respecto a la configuración horizontal convencional.

### Sistema cerrado en configuración slinky

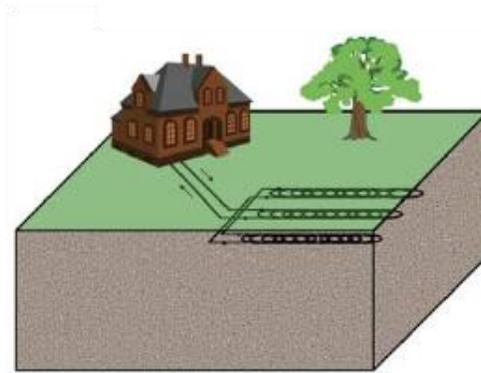


Figura 3.10 Sistema en configuración slinky. Fuente: Geothermal heat pump and heat engine systems: Theory and practice (Chiasson, 2016).

### c) Configuración en vertical

Esta configuración es empleada principalmente en instalaciones comerciales y ciudades con poca disponibilidad de superficie, requiriendo de 20 a 50m de tubería por cada kW térmico, usualmente estos sistemas tienen una profundidad de 100 a 150m con tuberías interconectadas en forma de “U”. Sus ventajas radican en el poco espacio superficial que se requiere, la energía mínima necesaria para el bombeo del fluido de trabajo y la poca variación de temperatura que se presenta respecto al estado del tiempo, sin embargo, los costos por la perforación suelen ser de gran magnitud respecto a las configuraciones horizontales.

### Sistema cerrado en configuración vertical

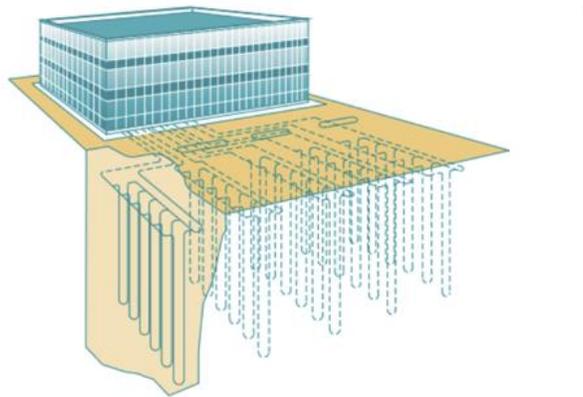


Figura 3.11 Sistema en configuración vertical. Fuente: Design and Installation of Residential Ground Source Heat Pump Systems (CGC, 2010).

### 3.3 Dimensiones del intercambiador de calor con el subsuelo

La Asociación Internacional de Bombas de Calor de Fuente Tierra (International Ground Source Heat Pump Association, IGSHPA) determinó una serie de ecuaciones que permiten calcular la longitud de tubería necesaria para un ciclo de calentamiento y enfriamiento respectivamente (IGSHPA, 2017):

$$L_H = \frac{C_H \times \frac{COP - 1}{COP} \times [R_P + (R_S \times F_H)]}{T_L - T_{min}} \quad (3.5)$$

$$L_C = \frac{C_C \times \frac{EER + 3.412}{EER} \times [R_P + (R_S \times F_C)]}{T_{max} - T_H} \quad (3.6)$$

Donde:

$R_P$  = Resistencia al calor por parte de la tubería

$R_S$  = Resistencia al calor por parte de la tierra

$F_H$  y  $F_S$  = Tiempo de operación

$T_L$  y  $T_H$  = Temperatura a la que se encuentra la tierra bajo la superficie

$T_{min}$  y  $T_{max}$  = Temperatura de operación para la BC.

Dichos estándares solamente son una referencia, por lo que es necesario realizar cálculos a detalle dependiendo las características del suelo, dado que la conductividad térmica del terreno es un parámetro que permite estimar de manera más atinada la cantidad de energía que se puede extraer o disipar a través de la tubería del sistema y de acuerdo con Pahud (2002), los valores típicos de conductividad térmica oscilan entre los 0.4-8 [W/mK]. Además, tomar en cuenta la carga térmica requerida por la edificación es un factor determinante en el cálculo del intercambiador de calor, las UN recomiendan mantener una temperatura de 23°C en el interior para garantizar condiciones de confort térmico, por lo que es necesario calcular el calor extraído e inyectado al subsuelo a través del sistema (UNDP, 2017). Para una BC, la tasa de calor extraído suele expresarse en términos

de toneladas de refrigeración<sup>11</sup> y una residencia convencional de 200m<sup>2</sup> está en el rango de tres toneladas.

La siguiente ecuación permite calcular el área de transferencia de calor a partir del flujo de calor hacia el exterior del intercambiador:

$$Q = U \cdot A_s \cdot \Delta T = U \cdot A_s \cdot (T_0 - T_{\text{suelo}}) \quad (3.7)$$

Donde:

Q = Flujo de calor al exterior del intercambiador de calor

U = Coeficiente de transferencia de calor

A<sub>s</sub> = Área de superficie de contacto

T<sub>0</sub> = Temperatura media del fluido al exterior del tubo

T<sub>suelo</sub> = Temperatura media del suelo

Una vez determinado el flujo de calor disipado por la pared externa de la tubería, es posible estimar el número de intercambiadores de calor necesarios para disipar la carga térmica total a la salida de la bomba de calor.

### 3.4 Sistemas de distribución

Existen dos maneras de distribuir el calor dentro de una edificación, ya sea con un sistema de aire forzado (agua-aire) o bien, con un sistema hidrónico (agua-agua). El sistema de distribución y el intercambiador de calor con el subsuelo se interconectan en la bomba de calor, la diferencia en la operación radica en la etapa final de transferencia de calor con el refrigerante.

Los sistemas hidrónicos emplean agua como medio de transporte a través de tuberías que se encuentran bajo el suelo de la edificación, también conocido como suelo radiante, garantizando una temperatura uniforme entre los 20-25°C dentro de la habitación, mientras que, para un sistema de aire forzado se emplean

---

<sup>11</sup> Tonelada de refrigeración: Capacidad de un sistema de refrigeración para congelar una tonelada de agua líquida a 0°C en hielo a 0°C en 24 horas. Una tonelada de refrigeración es equivalente a 211 kJ/min o 3517 W (Cengel & Boles, 2011).

ventiladores que deben estar ajustados con la temperatura disponible del agua en la bomba de calor, de tal manera que el aire circulante sea capaz de proveer el confort térmico necesario.

### Distribución de temperaturas con diferentes sistemas de climatización

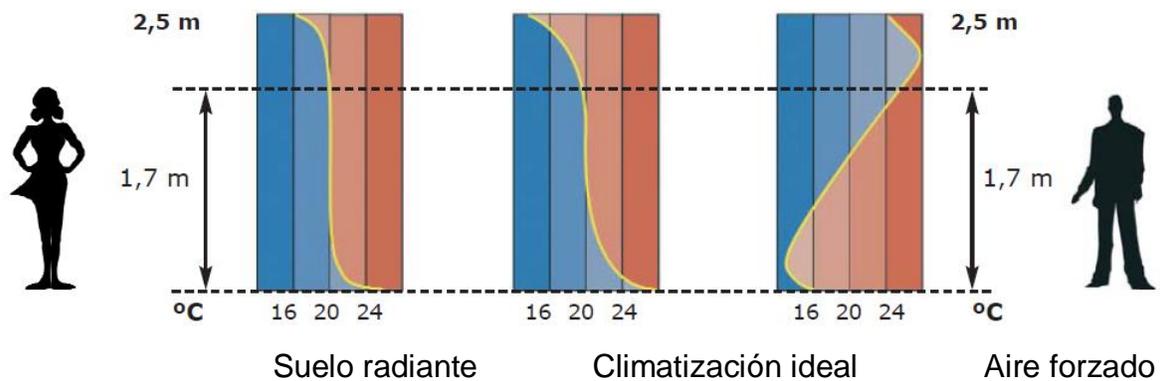


Figura 3.12 Distribución de temperaturas con diferentes sistemas de climatización. Fuente: Radiant Floor Heating System, Technical Catalogue (Standard-Hidráulica).

Al comparar los sistemas hidráulicos y de aire forzado, se sabe que los sistemas hidráulicos ofrecen una gran eficiencia termodinámica debido a que se emplea una bomba en vez de un ventilador, brindando un mayor confort térmico a lo largo de la habitación, sin embargo, este sistema tiene un gran costo de instalación asociado que debe ser considerado durante la etapa de construcción de la edificación. Por otro lado, a pesar de que los sistemas de aire forzado no dan un confort térmico homogéneo en la habitación, el costo de instalación es menor dado que un gran número de inmuebles adquieren estos sistemas de climatización cuando son habitados y se cumple con los requerimientos térmicos de habitabilidad.

## 4 Análisis de ciclo de vida

Hacer frente al cambio climático y atender los retos del desarrollo sostenible, hace necesaria la cuantificación de impactos ambientales que derivan de los procesos y productos, con la finalidad de encontrar la manera eficiente de satisfacer nuestras necesidades. El Consejo Mundial de Negocios para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés) (2006), define el concepto de eco-eficiencia como la entrega de productos y servicios a precios competitivos y, que progresivamente reduzcan los impactos ambientales en cada una de las etapas de producción, así como su dependencia de recursos a través de su ciclo de vida a un nivel que pueda ser soportado por las capacidades de la Tierra.

El ACV es una metodología, que integra impactos ambientales, con la intención de orientar la toma de decisiones y elaboración de políticas, a partir de la cuantificación del consumo energético y material y, de los contaminantes emitidos al medio ambiente, para identificar y evaluar oportunidades de mejora en la calidad ambiental durante la elaboración de productos y servicios.

Esta importante y ambiciosa metodología del ACV será descrita en éste capítulo, considerando las principales características que debe contener, así como su evolución en el tiempo y la relevancia que ha tomado en la cuantificación de impactos ambientales, en especial, para sistemas de climatización como las BC.

### 4.1 Desarrollo y evolución del análisis de ciclo de vida

Antes de hablar de la metodología del ACV, es necesario desarrollar un pensamiento bajo la perspectiva del ciclo de vida (*life cycle thinking*) que nos permita ser conscientes sobre las implicaciones ambientales de crear productos y servicios, esto va desde la obtención de los materiales necesarios para elaborar el producto, sus procesos de manufactura, el transporte, el uso y la decisión sobre la disposición final del bien una vez que ha terminado su vida útil. Lo anterior, también se conoce bajo el concepto “de la cuna a la tumba” (*cradle to grave*), el cual hace alusión al

entendimiento de las actividades que derivan de la extracción de las materias primas y la manera en la que regresan en forma de deshecho (Azapagic, 2010). La representación esquemática del *life cycle thinking*, en un modelo simple, se muestra a continuación:

**Modelo de ciclo de vida en una perspectiva “de la cuna a la tumba”**

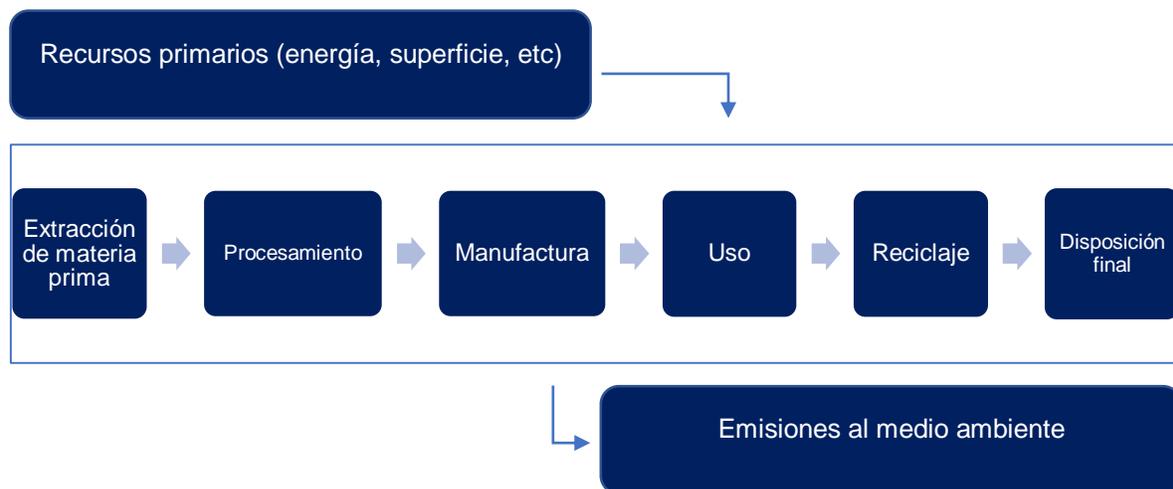


Figura 4.1 Modelo de ciclo de vida en una perspectiva "de la cuna a la tumba". Fuente: Adaptación de The Hitch Hiker's Guide to LCA (Baumann & Tillman, 2004) y Sustainable Development in Practice (Azapagic, 2010).

En el año de 1969, el Midwest Research Institute condujo el primer ACV para que la empresa Coca-Cola determinara si le era más conveniente emplear contenedores de vidrio o plástico y así, reducir los costos asociados al consumo de combustible durante la entrega de sus productos y al reciclaje del empaque (Baumann & Tillman, 2004; Hoffman & Schmidt, 1997; Matthews, Hendrickson, & Matthews, 2015). En un inicio, gran parte de los estudios de ACV que se condujeron entre 1970 y 1990 estaban orientados a la comparación entre diferentes métodos y tipos de empaque pero la conciencia social sobre el medio ambiente creció rápidamente durante la época de los 90s, como consecuencia de un desastre químico en Bhopal (1984) y la explosión del reactor nuclear en Chernobyl (1986), haciendo que los ACV fueran cada vez más aceptados dentro de diferentes industrias (Baumann & Tillman, 2004).

De acuerdo a un análisis llevado a cabo por Hou et al. (2015), alrededor de 6,616 artículos relacionados al ACV fueron publicados entre 1998 y 2013, siendo Estados

Unidos de Norte América, España, China, Alemania y Reino Unido los países que más publicaciones generaron durante ese periodo.

**Número de publicaciones de análisis de ciclo de vida (1998-2013)**

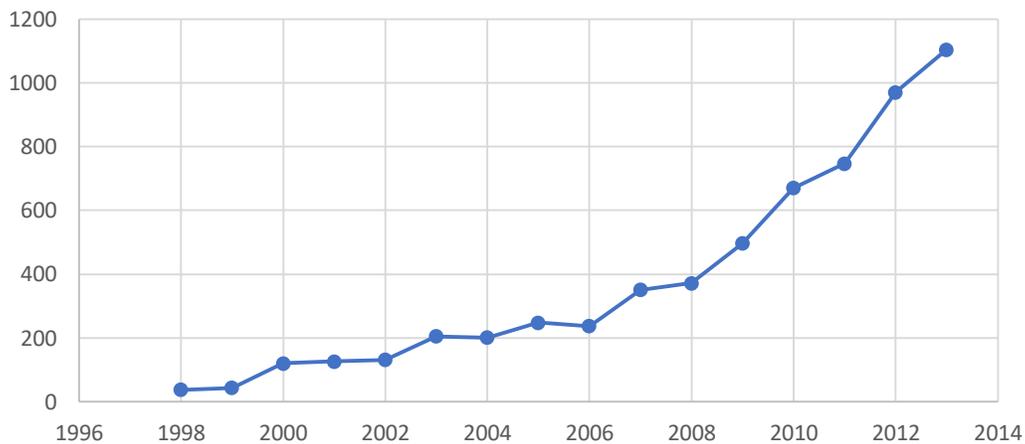


Figura 4.2 Número de publicaciones de análisis de ciclo de vida 1998-2013. Fuente: Gráfica hecha a partir de Mapping the scientific research on life cycle assessment: a bibliometric analysis (Hou et al., 2015).

Tras la evolución y aceptación del ACV, en 2002, la Sociedad de Toxicología y Química del Medio Ambiente (SETAC, por sus siglas en inglés) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) crearon la iniciativa “*Life Cycle Initiative*” para promover el diálogo entre diferentes actores, así como el intercambio de conocimientos y experiencias durante la toma de decisiones en el sector público y privado, estableciendo procesos y consensos basados en información científica para dar soporte al desarrollo de políticas que permitan un desarrollo sostenible (UNEP & SETAC, 2016).

Desarrollar la metodología del ACV fue una labor que comenzó en la década de los 90s a través de las primeras conferencias y foros de discusión científica, de hecho la metodología era conocida como: ecobalances, análisis de los perfiles de recursos y ambientales, análisis medio ambiental integral, etc (Baumann & Tillman, 2004). La definición del término ACV fue definido en primera instancia por la SETAC como el “proceso de evaluación de descargas medio ambientales asociadas con un producto, proceso o actividad, al identificar y cuantificar la energía y materiales empleados y desperdicios descargados al medio ambiente, con la intención de

evaluar el impacto de los consumos energéticos y materiales empleados y descargados al medio ambiente, identificando y evaluando oportunidades de mejora para el medio ambiente” (Guinée, 2011) y tras siete conferencias llevadas a cabo entre 1990 y 1993, la SETAC publicó los primeros lineamientos en un código de prácticas para ACV y, la estandarización de la metodología fue emitida en 1997 por la Organización Internacional de Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés), en el documento “ISO 14040:1997 Gestión ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Principios y marco de referencia” (Baumann & Tillman, 2004; Hoffman & Schmidt, 1997).

## 4.2 Fases del análisis de ciclo de vida

La norma ISO 14040 (ISO, 1997) define al ACV como “una técnica que permite evaluar los aspectos y potenciales impactos ambientales asociados con un producto, proceso y actividad, mediante la recopilación de un inventario de las entradas y salidas más relevantes del sistema, evaluando los potenciales impactos ambientales asociados a dichas entradas y salidas, interpretando los resultados obtenidos de las fases de análisis de inventario y evaluación de impactos en relación con los objetivos del estudio”.

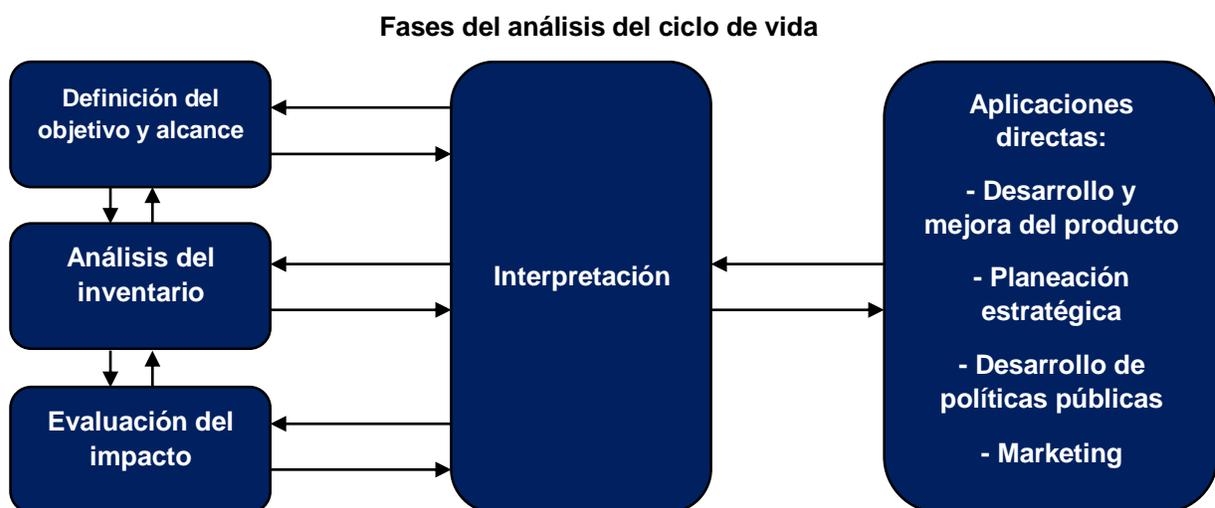


Figura 4.3 Fases del análisis del ciclo de vida. Fuente (ISO, 2006).

En el año 2006, se publicó la segunda edición de la ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, estableciendo las cuatro fases que componen y que deben conducir de manera sistemática los estudios de ACV, al considerar el objetivo y alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación.

#### **4.2.1 Definición de objetivos y alcance del estudio**

Definir un objetivo que identifique el propósito y las posibles aplicaciones que tendrá un ACV, es clave para orientar los resultados a un fin práctico. El objetivo del estudio se formula en términos de la pregunta que deseamos responder y comunicar a una audiencia determinada, por otro lado, el alcance se define en términos de la temporalidad, ubicación geográfica, contexto tecnológico y nivel de detalle al que se llevará el estudio. Finalmente, el objeto de estudio se describe en términos de su aplicación y uso, unidad funcional (UF), flujos de referencia, dejando claro los límites del sistema y los supuestos. A continuación se da una breve descripción sobre las consideraciones más importantes que se deben realizar en esta fase de acuerdo a la ISO 14040:2006 (ISO, 2006).

- Unidad funcional: La UF representa una medida cuantitativa del desempeño del sistema al tomar como referencia un flujo a la salida del mismo, la cual sirve para realizar comparaciones entre diferentes sistemas que cumplen con las mismas funciones.
- Límites del sistema: Los sistemas generalmente están compuestos de varios procesos y flujos, razón por la que es de gran importancia establecer las fronteras del sistema mediante la recopilación del total de procesos y flujos que interactúan y forman parte del sistema. Baumann & Tillman (2004) sugieren realizar un diagrama de flujo que englobe de manera general todas las entradas y salidas de los diferentes procesos. Posteriormente, se detallan los flujos energéticos y materiales asociados al sistema.
- Calidad de los datos: Obtener un resultado confiable que cumpla con los objetivos del estudio, requiere de una búsqueda de información con

parámetros geográficos, tecnológicos y de temporalidad, que den mayor precisión a los cálculos realizados, además del soporte a las hipótesis y supuestos.

Los objetivos y alcance normalmente son re-definidos y modificados al momento de llevar a cabo un ACV, a medida que se cuenta con información relevante y específica. Además, informar a los interesados sobre el avance del estudio, generalmente deriva en correcciones y modificaciones.

#### **4.2.2 Análisis del inventario de ciclo de vida**

El análisis de inventario se traduce en la construcción de un listado o tabla y un diagrama de flujo que recopile y cuantifique los flujos materiales y energéticos entrantes al sistema, así como las emisiones y residuos (descargas) salientes de este, todos los flujos se hacen en relación a la UF. Esta fase del ACV es iterativa debido a que, al contar con más información, se aprende más sobre el sistema y los requerimientos o limitaciones encontradas que demandan nuevos procedimientos durante la revisión documental.

La ISO 14044:2006 sugiere los siguientes pasos para lograr una convergencia entre el análisis de inventario y el objetivo del estudio (ISO, 2006):

- 1) Revisión documental basada en el objetivo y alcance
- 2) Recolección de datos
- 3) Validación de datos
- 4) Distribución de datos
- 5) Relación de datos con los procesos de manera unitaria
- 6) Relación de datos con en términos de la UF
- 7) Presentación de datos

Obtener datos por parte del analista o practicante que lleva a cabo el ACV requiere de información con especificaciones técnicas que generalmente son proporcionadas por el fabricante o son obtenidas a través de mediciones directas en compañía de un experto en la tecnología, proceso o producto que se desea

evaluar. En algunos casos, la información es difícil de obtener y se vuelve necesaria la consulta de bases de datos, sin embargo, en la mayoría de los análisis de inventario se realizan supuestos y estimaciones que cubren los huecos de información.

### **4.2.3 Evaluación del impacto**

La fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) es un proceso que busca describir las consecuencias medio ambientales a través de la cuantificación de las cargas identificadas durante la fase de inventario (Hoffman & Schmidt, 1997). Es posible agrupar los parámetros de la EICV en distintas categorías, las cuales, de manera general, incluyen el consumo de recursos, los potenciales daños a la salud y al ecosistema.

De acuerdo a la ISO 14040:2006 (ISO, 2006a), durante la fase de EICV se deben tomar en cuenta tres requerimientos obligatorios y cuatro opcionales:

- 1) Definición de las categorías de impacto: Especificación de los impactos medio ambientales de relevancia, de acuerdo con el objetivo y alcance.
- 2) Clasificación: Parametrización de las diferentes cargas identificadas en la EICV y asignación de sus categorías de impacto, de acuerdo a su naturaleza.
- 3) Caracterización: Cálculo que dimensiona los impactos ambientales de una carga en sus diferentes categorías, haciendo uso de factores de equivalencia y considerando las potenciales atribuciones que tiene dicha emisión en las cadenas de causa y efecto, basado en sus propiedades fisicoquímicas.
- 4) Normalización: Relación de los resultados de caracterización con valores de referencia para comprender la magnitud de los impactos ambientales causados por el sistema en estudio.
- 5) Agrupación: Clasificación de las categorías de impacto similares, mediante encabezados como emisiones al aire, agua, etc.
- 6) Ponderación: Importancia que presenta un impacto respecto a otro, a través de indicadores globales que permiten concientizar lo ética y científicamente correcto.

- 7) Análisis de la calidad de datos: Técnicas que permiten resaltar la importancia de los resultados de la EICV para identificar las actividades más contaminantes, información crucial y diferentes metodologías, en lo que se conoce como análisis de sensibilidad.

Además de lo anterior, un aspecto importante clave es la selección de una metodología apropiada como CML 2001, Eco-indicator 99, Ecological Damage Potential, IMPACT 2002+, IPCC 2007, TRACI, solo por mencionar algunas, las cuales han sido desarrolladas para describir los potenciales impactos de una manera más acertada, transparente y comprensible (Hischier et al., 2010).

Los métodos de evaluación de impacto están orientados al problema o al daño. Para el enfoque orientado al daño, también conocido como *midpoint*, se detalla un punto específico en el que es afectado el medio ambiente (causa y efecto), tales como la acidificación, potencial de calentamiento global, etc. Por otro lado, el enfoque orientado al daño, conocido como *endpoint*, se refiere al daño ocasionado en una zona debido al cambio de uso de suelo y sus afectaciones en áreas protegidas, en este caso los indicadores analizan los impactos desde una perspectiva macro, los cuales abarcan problemas a la salud, aspectos sociales y culturales y, afectación a los recursos naturales (Azapagic, 2010; Hauschild & Huijbregts, 2015).

#### **4.2.4 Interpretación de resultados**

En esta fase del ACV, se pretende identificar, calificar y evaluar los resultados obtenidos del análisis de inventario y la EICV, a manera que se cubran los requerimientos descritos en el objetivo y alcance del estudio. Las problemáticas ambientales y aspectos críticos deben ser presentados en un formato que facilite su lectura, por ejemplo: gráficos y diagramas, con un mensaje comprensible a manera de conclusiones y recomendaciones que permitan llevar a cabo mejoras del sistema y facilitar la toma de decisiones.

De acuerdo con la ISO (2006) y visto de manera sistemática, la fase de interpretación se lleva a cabo al:

- 1) Identificar las principales problemáticas: Hallazgos ambientales relevantes y consideraciones realizadas
- 2) Evaluar la consistencia y confiabilidad de los resultados
- 3) Elaborar conclusiones y recomendaciones

Se espera que las decisiones que derivan de los estudios de factibilidad de un proyecto incorporen las implicaciones ambientales identificadas en la fase de interpretación, así como la consideración de factores técnicos, económicos y sociales.

### 4.3 Administración de datos y herramientas de análisis

Gran parte de la información que compone la fase de análisis de inventario se obtiene a través de un sin número de fuentes, ya sea a través de proveedores, mediciones directas, literatura o bases de datos. En algunas ocasiones no existen datos disponibles y se deben hacer aproximaciones que se basan en tecnologías similares, para esto, existen herramientas auxiliares como *softwares* que permiten hacer cálculos e integran tanto bases de datos como criterios y metodologías de evaluación de impacto.

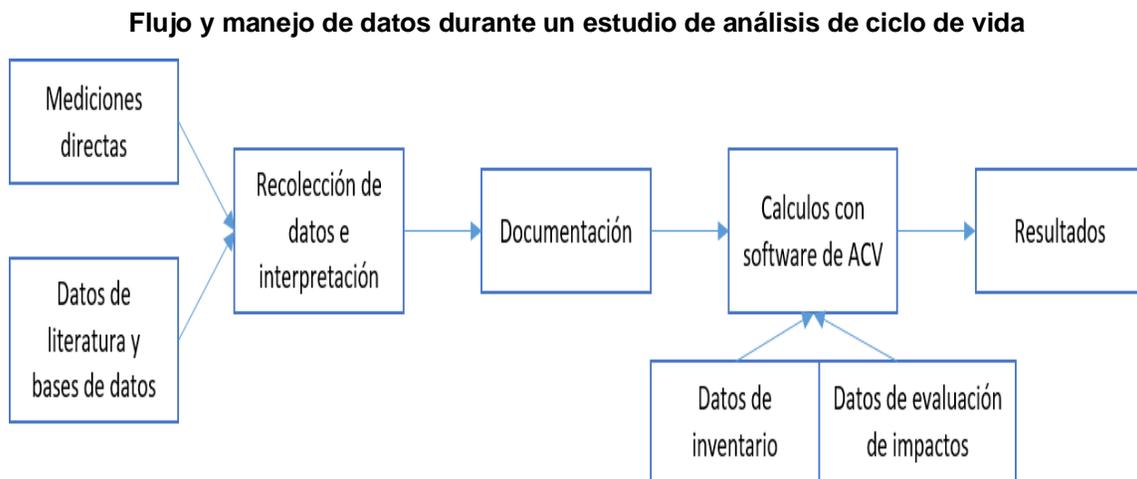


Figura 4.4 Flujo y manejo de datos durante un estudio de análisis de ciclo de vida. Fuente: The Hitch Hiker's Guide to LCA (Baumann & Tillman, 2004).

### **4.3.1 Software GaBi ®**

Existen un gran número de softwares<sup>12</sup> para el desarrollo de estudios de ACV, algunos de ellos son diseñados para un sistema o sector en particular y son clasificados de acuerdo con su capacidad computacional, la calidad de los datos que emplean para los cálculos y su alineación con la normatividad ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006. Generalmente el usuario define la base de datos que alimentará al software y el método de evaluación de impactos.

El presente estudio empleó el software GaBi®, el cual permitió llevar a cabo el modelado de cada fase del ACV mediante la recolección de datos, su organización y la presentación de resultados, haciendo un rastreo de los procesos de extracción de materias primas, la generación de electricidad y los flujos de emisiones asociados al sistema en evaluación. Además, reporta el desempeño del sistema y agrupa las descargas al medio ambiente en diversas categorías de impacto (PE-International, 2009).

La estructura modular de GaBi ® permite modelar de manera sencilla procesos complejos e integra información económica y social, tomando en cuenta las recomendaciones ISO al incorporar metodologías de EICV que cumplen los requerimientos necesarios de definición, clasificación y categorización. Por otro lado, las bases de datos incluidas en el software representan alrededor de 12,000 perfiles para la construcción del inventario, el cual puede ser desagregado y modificado de acuerdo con los límites del sistema.

### **4.3.2 Metodología CML 2001**

En 2001, el Centro de Ciencias Medio Ambientales (Center of Environmental Science, CML) de la Universidad de Leiden, publicó una guía que describe el procedimiento adecuado para conducir un ACV de acuerdo a la normatividad ISO,

---

<sup>12</sup> Se han identificado alrededor de 24 softwares para llevar a cabo un ACV, entre los que destacan: The Boustead, ECO-it, EDIP, EPS, GaBi, GEMIS, JEMAI-LCA, PEMS, REGIS, Sima-Pro, TEAM y Umberto (Baumann & Tillman, 2004).

proponiendo una serie de categorías de impacto que se describen a continuación (Hauschild & Huijbregts, 2015; Hischer et al., 2010):

- Potencial de acidificación: El potencial de acidificación (AP: Acidification Potential), se debe a la deposición de nitrógeno y azufre que resulta de óxidos nitrosos ( $\text{NO}_x$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y en menor proporción a la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), ácido fluorhídrico ( $\text{HF}$ ) y ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ). Las emisiones al aire se miden en kg de  $\text{SO}_2$  [kg  $\text{SO}_2$ -Eq].
- Potencial de calentamiento global: El potencial de calentamiento global (GWP: Global Warming Potential), se refiere a las emisiones antropogénicas de GEI emitidas a la atmósfera. Los cuatro principales GEI emitidos a causa de actividades humanas son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y los halocarbonos o CFCs. Los valores de GWP dependen del horizonte de tiempo sobre el cual se realiza la evaluación, se emplean periodos de 100 a 500 años para predecir los efectos acumulativos de los GEI en el clima global en términos de  $\text{CO}_2$  [kg  $\text{CO}_2$ -Eq].
- Potencial de agotamiento de la capa de ozono: El potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP: Ozone Layer Depletion Potential), hace referencia a la reducción del espesor de la capa de ozono originada por la reacción de los radicales libres contenidos en sustancias como los halocarbonos, los cuales reaccionan con el ozono ( $\text{O}_3$ ) presente en la estratósfera y exponen a los seres humanos a una mayor radiación de rayos UV. Las emisiones de clorofluorocarbonos y otros hidrocarburos halogenados que depletan la capa de ozono se miden en términos del gas freón o R-11 ( $\text{CCl}_3\text{F}$ ) [kg R-11-Eq].
- Potencial de toxicidad humana: El potencial de toxicidad humana (HTP: Human Toxicity Potential) es una aproximación que relaciona la exposición dermatológica por contacto directo de la piel con sustancias químicas orgánicas e inorgánicas presentes en el medio ambiente. Se emplean

factores de entre 180 y 1,250 sustancias<sup>13</sup> que impactan en la toxicidad humana. Para cada emisión de sustancias tóxicas al aire, agua y tierra se emplea el diclorobenceno como factor de referencia [kg 1,4-DCB-Eq].

- Potencial de oxidación fotoquímica: El potencial de creación de oxidantes fotoquímicos (POCP: Photochemical Oxidant Formation Potential), se origina por reacciones que ocurren en la atmósfera entre radicales OH, óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y compuestos orgánicos volátiles como alcanos, alquenos, aromáticos, aldehídos y alcoholes. Los principales oxidantes fotoquímicos son el ozono (O<sub>3</sub>), nitrato de peroxiacilo (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>NO<sub>5</sub>) y peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Usualmente este impacto se expresa en términos de etileno para cada emisión de compuestos orgánicos volátiles al aire [kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-Eq].
- Potencial de eutrofización: El potencial de eutrofización (EP: Eutrophication Potential) es el resultado de la acumulación de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno en un ecosistema terrestre y acuático. Este proceso provoca el crecimiento acelerado de algas y disminuye la concentración de oxígeno, pudiendo ocasionar que mueran diversas especies marinas. El EP se expresa en términos de fosfato [kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-Eq].
- Potencial de agotamiento de recursos abióticos: El potencial de agotamiento de recursos abióticos (ADP: Abiotic Resource Depletion), representa la disminución de aquellos elementos sin vida dentro del ecosistema (metales, minerales, petróleo, material radiactivo, la atmósfera y flujos de energía), que pueden ser extraídos y aprovechados por el ser humano. El impacto de esta categoría se expresa en kilogramos de antimonio, el cual se considera como la sustancia de referencia [kg Sb-eq].
- Potencial de ecotoxicidad: Cuantifica la toxicidad de una sustancia dependiendo la exposición que tengan diferentes organismos vivos, así como

---

<sup>13</sup> La American Chemical Society cuenta con un registro de más de 70 millones de sustancias orgánicas e inorgánicas, de las cuales alrededor de 100,000 representan un rol importante para la toxicidad humana. Fuente: <http://www.cas.org/about-cas/cas-fact-sheets>

sus impactos en el ambiente. Los potenciales de ecotoxicidad se agrupan en tres categorías, las cuales son: potencial de ecotoxicidad acuático de agua dulce (FAETP: Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential), potencial de ecotoxicidad acuático marino (MAETP: Marine Aquatic Ecotoxicity Potential) y el potencial de ecotoxicidad terrestre (TETP: Terrestrial Ecotoxicity Potential). Para cada emisión de sustancias tóxicas al aire, agua y tierra se emplea el diclorobenceno como factor de referencia [kg 1,4-DCB-eq].

Dependiendo de la cantidad de datos disponibles, el sistema se puede desagregar en subsistemas que representen operaciones unitarias o un grupo de operaciones, en este caso, las cargas ambientales pueden ser cuantificadas en cada subsistema a partir de la siguiente ecuación:

$$B_j = \sum_{i=1}^I bc_{j,i} X_i \quad (4.1)$$

Donde  $bc_{j,i}$  es la carga  $j$  proveniente del subsistema o actividad  $i$  y  $X_i$  es el flujo másico o energético asociado con dicha actividad. En general, los impactos son calculados con relación a un factor característico de un compuesto de referencia, siguiendo la siguiente ecuación;

$$E_k = \sum_{j=1}^J ec_{k,j} B_j \quad (4.2)$$

Donde  $ec_{k,j}$  representa el factor característico  $k$  de la carga  $B_j$  y su contribución relativa al impacto  $E_k$ . Por último y de manera opcional, la asignación de importancia relativa de cada impacto se puede condensar en una función general de impacto ambiental:

$$EI = \sum_{k=1}^K w_k E_k \quad (4.3)$$

Donde  $w_k$  es la importancia relativa del impacto  $E_k$ .

### **4.3.3 Base de datos Ecoinvent ®**

Con el objetivo de promover el uso y las mejores prácticas para la fase de análisis de inventario, el Centro Suizo para Inventarios de Ciclo de Vida (Swiss Centre for Life Cycle Inventories, también conocido como Ecoinvent Centre) proporciona datos, a través de la base de datos Ecoinvent®, para desarrollar los inventarios del ciclo de vida en una gran variedad de procesos que van desde la extracción de materia prima, generación y suministro de energía, transporte y transformación, hasta el manejo de residuos mediante aproximaciones que extrapolan datos de procesos conocidos a casos específicos y característicos de una región (Hischier, Weidema, & Bauer, 2013).

### **4.4 Aplicación del análisis de ciclo de vida en bombas de calor**

Las BC son una gran oportunidad para incrementar la eficiencia energética y mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> para los sectores residencial, comercial e industrial, abordado de manera previa en el capítulo 2. Sin embargo, es necesario contar con estudios de mayor complejidad, como un ACV, para estimar los impactos ambientales que se generan a lo largo del ciclo de vida de esta tecnología y que los tomadores de decisiones logren establecer un balance entre las descargas al medio ambiente y las emisiones abatidas.

En la Tabla 2, se presentan algunos estudios de ACV que evalúan diferentes tipos de BC, especialmente las que cuentan con intercambio de energía térmica con el subsuelo y para las diferentes fuentes renovables (agua, aire y suelo).

A pesar de la relevancia que han tomado en recientes años los estudios de ACV, como se puede notar en la Tabla 2, la información reportada en la literatura no es homogénea para evaluar y comparar diferentes tecnologías de BC, dado que de acuerdo a la normatividad ISO:14040 (ISO, 2006) la UF debe ser la misma para todos los sistemas y así lograr una estandarización. Esto resulta en información que difícilmente respalde la contribución que tienen las BC en la reducción de contaminantes a lo largo de su ciclo de vida, más allá de la información técnica

disponible sobre el desempeño o su tiempo de retorno entre el costo de inversión y el *payback* del ahorro energético.

De acuerdo a un análisis documental llevado a cabo por Marinelli, Lolli, Gamberini, & Rimini (2018), se ha identificado que el mayor impacto ambiental de una BC ocurre durante la etapa de uso debido al consumo energético, el cual depende indudablemente del mix energético y del coeficiente de desempeño del dispositivo. En contraste y al ser comparada una BC fuente tierra contra una fuente aire, la BC de fuente tierra presenta un mayor impacto ambiental durante su manufactura e instalación debido a que requiere más materiales para su fabricación, así como la excavación donde se encuentra ubicado el intercambiador de calor, sin embargo, durante la operación de la bomba se presenta un menor consumo energético. Por último, al realizar análisis de sensibilidad, se ha determinado que al modificar la matriz energética se pueden observar cambios en AP, EP y GWP, para las tuberías de HDPE y AI cambios en el POCP y ADP respectivamente y los refrigerantes impactan principalmente en el ODP.

**Tabla 2 Estudios de análisis de ciclo de vida para bombas de calor fuente suelo. Fuente: Elaboración propia.**

Autor	Título	UF	COP	Tiempo de vida BC (años)	Fuente / configuración	Región
(Nitkiewicz & Sekret, 2014)	Comparison of LCA results of low temperature heat plant using electric heat pump, absorption heat pump and gas-fired boiler	3,185 GJ (calor promedio para satisfacer la demanda de una comunidad)	5.5	20	Agua / open loop	Polonia
(Russo, Anifantis, Verdiani, & Mugnozza, 2014)	Environmental analysis of geothermal heat pump and LPG greenhouse heating systems	1 kWh	4.7	20	Agua / closed loop	Italia

Autor	Título	UF	COP	Tiempo de vida BC (años)	Fuente / configuración	Región
(Blum et al., 2010)	Is it only CO <sub>2</sub> that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems	Calor producido durante el tiempo de vida	4	20	Tierra / vertical	Suiza
(Li & Smith, 2012)	Investigations of life cycle climate performance and material life cycle assessment of packaged air conditioners for residential application	Calor producido durante el tiempo de vida	4	20	Tierra / horizontal y vertical	Estados Unidos de Norteamérica
(Chiavetta, Tinti, & Bonolia, 2011)	Comparative life cycle assessment of renewable energy systems for heating and cooling	400 L de agua caliente	3	20	Tierra / vertical	Italia
(Koroneos & Nanaki, 2017)	Environmental impact assessment of a ground source heat pump system in Greece	1 kWh	4	25	Tierra / vertical	Grecia
(Ren, Deng, & Cao, 2018)	Evaluation of polyethylene and steel heat exchangers of ground source heat pump systems based on seasonal performance comparison and life cycle assessment	Calor producido durante el tiempo de vida	4	20	Tierra / vertical	China
(Greening & Azapagic, 2012)	Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK	1 kWh	3.9	20	Tierra / vertical y horizontal	Reino Unido
(Huang & Mauerhofer, 2016)	Life cycle sustainability assessment of ground source heat pump in Shanghai, China	Ahorro de energía con BC vs consumo tradicional	2.7	20	No especifica	China

Autor	Título	UF	COP	Tiempo de vida BC (años)	Fuente / configuración	Región
(Heikkilä, 2008)	Environmental evaluation of an air-conditioning system supplied by cooling energy from a borehole-based heat pump system	5 m3/s (flujo variable de aire)	2.1	15	Tierra / vertical	Suecia
(Genkinger, Dott, & Afjei, 2012)	Combining heat pumps with solar energy for domestic hot water production	5.1 kW	No específica	20	Agua / closed loop	Suiza
(Abusoglu & Sedeeq, 2013)	Comparative exergoenvironmental analysis and assessment of various residential heating systems	Mantener un edificio a 19°C	3.28	25	Tierra / vertical	Turquía
(Ioannis, 2014)	Environmental Performance Assessment of Heat Pumps	1 kWh	3.7	20	Tierra / vertical	Grecia
(Kim, Hong, Chae, Koo, & Jeong, 2015)	An environmental and economic assessment for selecting the optimal ground heat exchanger by considering the entering water temperature	Calor producido durante el tiempo de vida	No específica	40	Tierra / vertical	Korea

## 5 Análisis de ciclo de vida para una bomba de calor en México

Impulsar un futuro energético descarbonizado a través de la promoción y adopción de nuevas tecnologías, requiere de acciones estratégicas que permitan alcanzar las metas de reducción de emisiones de GEI, primordialmente, además de la reducción del consumo energético en el sector comercial y residencial mediante la eficiencia energética. Dicho lo anterior y considerando el contexto nacional, se desea contribuir a la toma de decisiones y brindar un estudio que proporcione información sobre los posibles impactos ambientales que pueden generarse con el despliegue de las BC, atendiendo a la recomendación emitida en el *“Mapa de Ruta Tecnológica: Usos Directos del Calor Geotérmico”* (SENER, 2018), al evaluar la sostenibilidad ambiental para las diferentes tecnologías involucradas en los proyectos de usos directos del calor geotérmico, en este caso una BC con geointercambio para mejorar su desempeño ambiental y energético a lo largo de su ciclo de vida, tomando en cuenta las mejores prácticas internacionales.

Como resultado de la revisión literaria, se utilizarán valores de tiempo de vida para la tecnología de BC de 20 años y una UF de 1 kWh, tomando en cuenta consideraciones relevantes del sistema, tales como el gas refrigerante, fluido de trabajo, transporte, etc., de tal manera que los supuestos realizados durante el presente estudio sean respaldados por información de estudios similares, con la intención de identificar los límites del sistema y minimizar desviaciones durante la EICV, bajo los lineamientos de la ISO 14040:2006, descritos en el capítulo anterior.

### **Bomba de calor del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México**



Figura 5.1 Bomba de calor del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Fuente: Propia.

## 5.1 Objetivo y alcance del estudio

Con el objetivo de orientar las políticas de uso de TRECE y su regulación correspondiente en los sectores comercial, industrial y residencial en México, el presente estudio de ACV busca identificar la solución técnica con los mayores beneficios ambientales para sistemas de BC con geointercambio, deseando que los resultados favorezcan la toma de decisiones y la implementación de más proyectos de este tipo, ya que su participación es mínima en el contexto nacional.

El sistema toma en cuenta las características del suelo típico de Baja California (Leptosol<sup>14</sup>), empleando una BC capaz de satisfacer una demanda térmica de 3,517 W para una vivienda ubicada de Mexicali.

Por último, el alcance del sistema se considera de la cuna a la tumba, desde la extracción de la materia prima hasta el fin de su vida útil, identificando los mayores impactos ambientales (*hot spots*) ocasionados durante cada una de las etapas del ciclo de vida de la tecnología y en una segunda etapa, se realiza un análisis de sensibilidad para modelar diferentes escenarios.

### 5.1.1 Unidad funcional

La función o utilidad de la BC es la conversión de energía eléctrica en energía térmica mediante el aprovechamiento de fuentes renovables como el aire, agua y suelo, siendo estas una variable en el desempeño del sistema. El presente estudio evalúa el desempeño ambiental de una BC durante la generación de 1kWh de energía térmica para la climatización de una vivienda típica en la región de Mexicali. La UF se define como 1 kWh y es particularmente importante, ya que permite comparar diferentes tecnologías de climatización, intercambiadores de calor (materiales, fluidos de transporte, configuración, etc.) y medios de disipación durante la generación de energía térmica para la satisfacción de confort térmico. Por lo anterior, se considera que una UF de 1 kWh es la más apropiada debido a

---

<sup>14</sup> Leptosol: Son suelos muy delgados, pedregosos y poco desarrollados que pueden contener una gran cantidad de contenido calcáreo. Son los suelos de mayor distribución a nivel mundial y son particularmente comunes en las zonas montañosas y en planicies calizas superficiales (SEMARNAT, 2012).

que permite comparar diferentes sistemas de climatización que cumplen con la misma función, convertir energía eléctrica en energía térmica.

### **5.1.2 Vida útil**

Se considera un tiempo de vida de 20 años para todos los componentes del sistema, tomando en cuenta las pérdidas asociadas al gas refrigerante durante el tiempo de operación.

### **5.1.3 Límites del sistema**

El estudio se centra en el desempeño que presenta una BC con una capacidad de 3 ton de refrigeración, durante su operación en una vivienda ubicada en Mexicali y la identificación de las mayores cargas ambientales que presentan los diferentes componentes del sistema. La localización geográfica del sitio de estudio se ubica en las coordenadas 32° 31' 6.84" de latitud Norte y 115° 28' 5.88" de longitud Oeste y se considera una conductividad térmica promedio de 0.7 [W/mK].

El cálculo de las dimensiones de las tuberías y el número total de intercambiadores de calor depende de las propiedades térmicas del suelo de la región. Si se desea replicar un ACV para un sistema similar, se deberá estimar de manera previa la energía térmica que se puede extraer o disipar mediante el intercambiador de calor con el subsuelo y en una segunda etapa, calcular los flujos materiales correspondientes al intercambiador de calor.

El diagrama que se muestra en la Figura 5.2 toma en cuenta los flujos materiales y energéticos necesarios para las diferentes etapas del ciclo de vida. En una primera fase se considera la extracción y procesamiento de las materias primas empleadas para la manufactura de la BC y las tuberías que conforman el intercambiador de calor con el subsuelo. Dichos materiales son transportados desde el sitio de fabricación hasta el sitio de instalación. Consecuentemente se procede al ensamblaje y la perforación de los agujeros en el subsuelo para lograr instalar el sistema. Una vez que el sistema de climatización se encuentra instalado, tienen lugar las etapas de operación y mantenimiento, las cuales se llevan a cabo de

manera periódica durante el tiempo útil de la BC, hasta proceder a la disposición final de la misma.

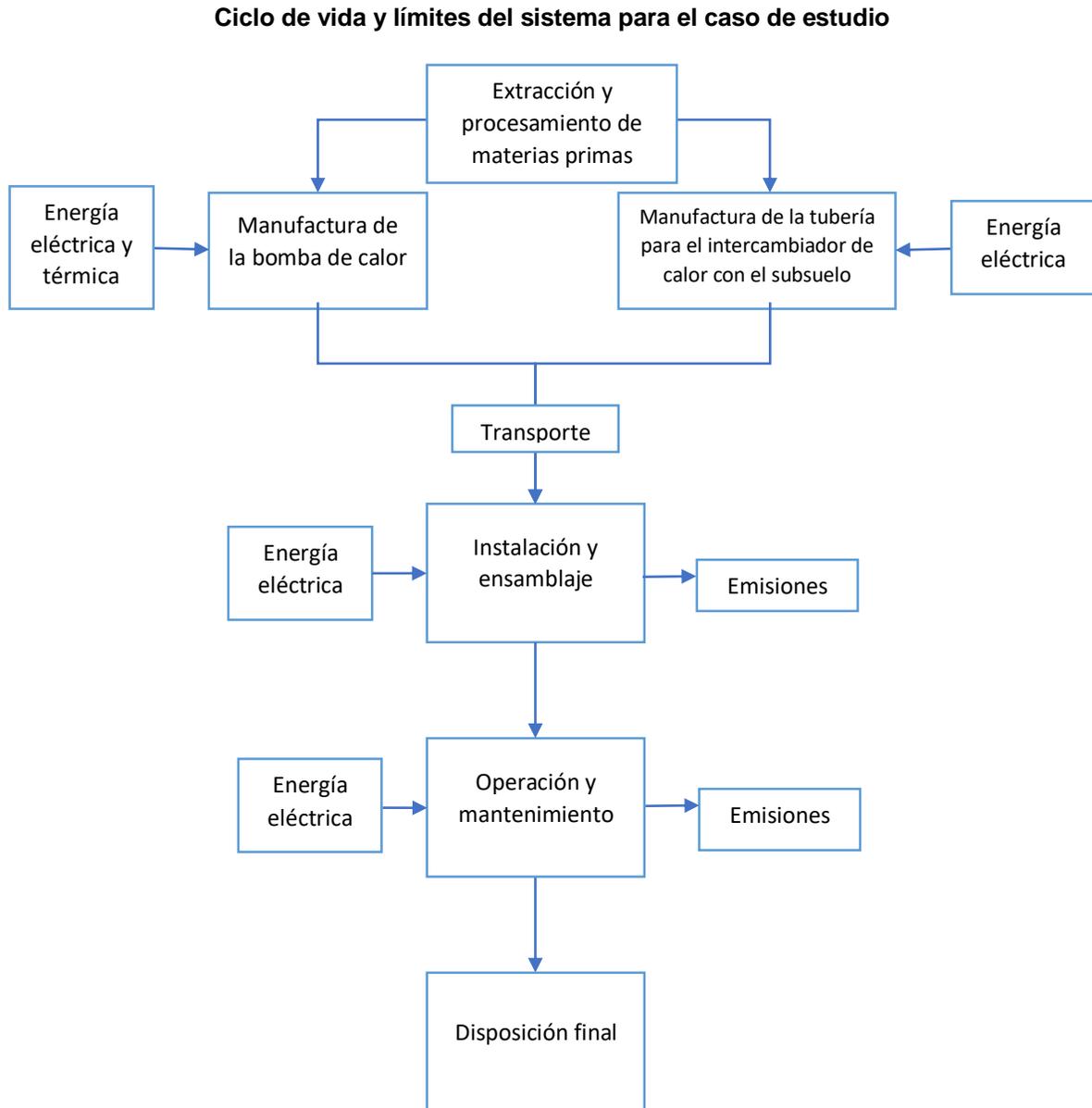


Figura 5.2 Ciclo de vida y límites del sistema para el caso de estudio. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la NOM-161-2011 (SEMARNAT, 2013), una BC se considera un residuo de manejo especial, sin embargo, el reciclaje de los componentes del sistema no se considera dentro del análisis, dado que la normativa nacional no especifica en los Planes de Residuos de Manejo Especial el porcentaje que deberá

ser reciclado durante la disposición final del dispositivo. Idealmente, los metales como el acero y el cobre pueden ser recuperados en su totalidad para ser reutilizados, por otro lado, el gas refrigerante puede emplearse en algún otro proceso de refrigeración, tomando en cuenta las pérdidas asociadas a la operación. En el caso del etilenglicol, éste debe ser tratado en una planta de tratamiento de aguas residuales, mientras que los plásticos son enviados a un relleno sanitario.

#### **5.1.4 Hipótesis y consideraciones**

Se espera observar una variación de impactos ambientales durante la implementación y operación de una BC con geointercambio a partir de la generación de escenarios. Dado que la función de la BC es la conversión de energía eléctrica en energía térmica, se pretende evaluar el desempeño ambiental de la misma durante su ciclo de vida. Para cada escenario se considera la generación de 1 kWh de energía térmica. La UF nos permite realizar una comparación para esta tecnología al modificar los materiales que componen el intercambiador de calor con el subsuelo y la fuente energética que suministra energía al sistema.

En el caso base (CB) se evalúa un intercambiador de calor con tubos concéntricos de policloruro de vinilo (PVC) / Al, cuya fuente energética proviene del sistema energético nacional. Posteriormente, se realiza el análisis de sensibilidad de tuberías (AST), en donde se realiza una variación en la tubería del intercambiador de calor con el subsuelo al emplear PVC / HDPE, materiales que poseen diferente conductividad térmica. Por último, se emplea un módulo solar fotovoltaico (MSF) como fuente energética durante la operación del sistema, ya que la generación descentralizada en pequeña escala puede significar una alternativa para el aprovechamiento de los recursos solares, de tal manera que el sistema sea independiente de la matriz energética nacional, esperando que la contribución al consumo energético de espacios y las emisiones de GEI asociadas disminuyan.

El estudio está limitado al equipo de BC (COP = 4.1) y al dispositivo de intercambio de calor con el subsuelo, ya que no considera un sistema de distribución acoplado a la BC. Por otro lado, el dimensionamiento del sistema para los distintos escenarios

se basa en la demanda local de confort térmico equivalente a 3 toneladas de refrigeración, por un periodo de operación de 12 horas diarias durante 6 meses.

Como se menciona anteriormente, no se considera una etapa de reciclaje para los materiales metálicos, sin embargo, las emisiones directas asociadas a las pérdidas anuales para el gas refrigerante equivalen al 6% durante la operación de la bomba (Greening & Azapagic, 2012).

## 5.2 Análisis del inventario de ciclo de vida del sistema

Las especificaciones para los flujos de entrada se hicieron con soporte de la base de datos Ecoinvent® v3.1, información brindada por los proveedores, así como de los resultados obtenidos por pruebas experimentales (Rubalcaba, 2017). En la Tabla 3, se muestran los flujos de referencia para la UF y en las tablas subsecuentes se muestran los flujos de entrada para cada una de las etapas, así como su normalización a la UF.

**Tabla 3 Factor de conversión para unidad funcional. Fuente: Elaboración propia.**

Flujo de referencia	Consumo kWh / día	Operación (días / año)	Tiempo de vida útil (años)	Consumo total de energía durante el ciclo de vida (kWh)	Factor de conversión a la UF (1/kWh)
Consumo energético para satisfacer la demanda de confort térmico	38.38	184	20	1.41E05	7.08E-06

En la primera etapa (ver Tabla 4) se cuantifica el material necesario para la manufactura de la BC, tomando en cuenta su extracción y procesamiento. Posteriormente, los materiales son ensamblados para disponer del equipo integrado (ver Tabla 5).

**Tabla 4 Materiales para manufactura de la bomba de calor. Fuente: Elaboración propia a partir de información de (Goodman, 2013; Rubalcaba, 2017).**

Uso	Tipo de flujo	Cantidad (kg)	Cantidad normalizada a la UF (kg/kWh)
Evaporador y condensador	Acero de baja aleación	20	1.42E-04
Carcasa	Acero	107.7	7.63E-04
Compresor	Acero	22.3	1.58E-04
Bomba centrífuga de 1/2 HP	Hierro fundido	9	6.37E-05
Aceite lubricante	Aceite lubricante	0.9	6.23E-06
Proceso termodinámico	Refrigerante R134a	3.8	2.73E-05
Tuberías, intercambiador concéntrico, válvula de 4 vías y cableado	Cobre	7.9	5.63E-05
Recubrimiento del cableado	Plástico	1.5	1.06E-05
Aislamiento térmico	Plástico	4	2.83E-05

**Tabla 5 Manufactura de la bomba de calor. Fuente: Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK (Greening & Azapagic, 2012)**

Uso	Tipo de flujo	Cantidad (MJ)	Cantidad normalizada a la UF (MJ/kWh)
Soldaduras y ensamblaje	Energía (gas)	875	6.19E-03
Soldaduras y ensamblaje	Energía (eléctrica)	337	2.37 E-03

En el caso de la manufactura de las tuberías de PVC, Al y HDPE se realizaron las siguientes consideraciones, de acuerdo con la cantidad de tubería necesaria para el CB y AST. Las Tabla 6 y Tabla 8 cuantifican la cantidad material requerida para la fabricación de los intercambiadores de calor, mientras que las Tabla 7 y Tabla 9 corresponden al consumo energético durante la fase de manufactura de las tuberías, tales como el proceso de moldeo del acero y extrusión del plástico.

**Tabla 6 Materiales para manufactura de tuberías, caso base. Fuente: Elaboración propia.**

Uso	Tipo de flujo	Cantidad (kg)	Cantidad normalizada a la UF (kg/kWh)
Tubo PVC	PVC granulado	16.1	1.14E-04
Tubo AI	Lámina de acero inoxidable	31.8	2.25E-04

**Tabla 7 Energía para manufactura de tuberías, caso base. Fuente: Elaboración propia a partir de Estimate of energy consumption and CO2 emission associated with the production, use and final disposal of PVC, HDPE, PP, ductile iron and concrete pipes (Baldasano, Jiménez, & Parra, 2005).**

Uso	Tipo de flujo	Cantidad (MJ)	Cantidad normalizada a la UF (MJ/kWh)
Procesamiento tubo PVC	Energía para producir tubería de PVC	7.3	1.85E-04
Procesamiento tubo AI	Energía para producir tubería de Acero Inoxidable	25.5	6.49E-04

**Tabla 8 Materiales para manufactura de tuberías, análisis de sensibilidad de tuberías. Fuente: Elaboración propia.**

Uso	Tipo de flujo	Cantidad (kg)	Cantidad normalizada a la UF (MJ/kWh)
Tubo PVC	PVC granulado	91.5	6.47E-04
Tubo HDPE	HDPE granulado	62.2	4.40E-04

**Tabla 9 Energía para manufactura de tuberías, análisis de sensibilidad de tuberías. Fuente: Elaboración propia a partir de Estimate of energy consumption and CO<sub>2</sub> emission associated with the production, use and final disposal of PVC, HDPE, PP, ductile iron and concrete pipes (Baldasano et al., 2005).**

<b>Función</b>	<b>Tipo de flujo</b>	<b>Cantidad (MJ)</b>	<b>Cantidad normalizada a la UF (MJ/kWh)</b>
Procesamiento tubo PVC	Energía para producir tubería de PVC	41.2	1.05E-03
Procesamiento tubo HDPE	Energía para producir tubería de HDPE	49.8	1.27E-03

Asumiendo que el traslado de la unidad de BC y tuberías se realiza desde la planta del proveedor situada en Houston, Texas hasta el sitio de instalación en Mexicali, Baja California, se recorre un total de 2,179km por vía terrestre (ver Tabla 10).

**Tabla 10 Transporte del sistema. Fuente: Elaboración propia.**

<b>Uso</b>	<b>Tipo de flujo</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Cantidad normalizada a la UF (MJ/mWh)</b>
Transporte terrestre	Camión con motor de diésel EURO 4	2179	1.54E-2

Durante la fase de instalación se cuantifica el combustible consumido durante la perforación de los agujeros en el subsuelo (Tabla 11 y Tabla 13) y, por otro lado, el fluido de trabajo (etilenglicol) empleado en el intercambiador de calor con el subsuelo para cada caso (Tabla 12 y Tabla 14).

**Tabla 11 Consumo energético para la instalación del sistema, Caso Base. Fuente: Elaboración propia.**

<b>Uso</b>	<b>Tipo de flujo</b>	<b>Cantidad (MJ)</b>	<b>Cantidad normalizada a la UF</b>
Perforación	Diésel para la máquina perforadora	97.2	6.88E-04

**Tabla 12 Fluido de trabajo para el sistema, Caso Base. Fuente: Elaboración propia.**

Uso	Tipo de flujo	Cantidad (kg)	Cantidad normalizada a la UF
Fluido de trabajo	Etilenglicol	6.6	4.67E-05

**Tabla 13 Consumo energético para la instalación del sistema, análisis de sensibilidad de tuberías. Fuente: Elaboración propia.**

Uso	Tipo de flujo	Cantidad (MJ)	Cantidad normalizada a la UF
Perforación	Diésel para la máquina perforadora	550.8	3.89E-03

**Tabla 14 Fluido de trabajo para el sistema, análisis de sensibilidad de tuberías. Fuente: Elaboración propia.**

Uso	Tipo de flujo	Cantidad (kg)	Cantidad normalizada a la UF
Fluido de trabajo	Etilenglicol	37.4	2.65E-04

En la Tabla 15 se presenta la energía eléctrica consumida por la BC durante la operación del sistema, mientras que para la fase de mantenimiento, se muestran en la Tabla 16 las principales implicaciones son el gas refrigerante reinyectado, equivalente a las pérdidas durante la operación, al igual que el recambio de aceite lubricante que garantiza el buen funcionamiento del equipo.

**Tabla 15 Operación del sistema. Fuente: Elaboración propia.**

Uso	Tipo de flujo	Cantidad (kWh)	Cantidad normalizada a la UF
Climatización	Energía (eléctrica)	1.41E05	1

**Tabla 16 Materiales para mantenimiento del Sistema. Fuente: Elaboración propia.**

Uso	Tipo de flujo	Cantidad (kg)	Cantidad normalizada a la UF
Aceite lubricante	Aceite lubricante	0.9	6.23E-06
Proceso termodinámico	Refrigerante R134a	4.6	3.27E-05

Por último, el suministro de energía proveniente de la red eléctrica es sustituido por un MSF de 3kWp, asumiendo que éste se encuentra en su máxima eficiencia de generación eléctrica durante el periodo de operación de la BC y cuyos impactos ambientales se basan en un estudio de ACV realizado para México (Martínez, 2017).

### 5.3 Evaluación del impacto

Bajo las consideraciones descritas y el inventario mostrado, el presente estudio de ACV emplea el software GaBi® v6, la base de datos Ecoinvent® v3.1 y la metodología CML 2001 para la categorización de impactos ambientales, lo anterior se describe en el capítulo 4.

Los resultados obtenidos durante la EICV se basan en la UF de 1 kWh y se dividen en tres secciones. En una primera instancia se muestran los valores para el CB, el cual considera un sistema de geointercambio con un intercambiador de calor con tubos concéntricos de PVC y Al. El AST muestra los valores de impacto que varían para un intercambiador de tubos concéntricos de PVC y HDPE respecto al CB, de igual manera, se muestran los valores del análisis de sensibilidad para la fuente energética (ASFE) con el MSF para la fase de operación.

La Tabla 17, muestra los resultados de la EICV para cada una de las categorías de impacto utilizando la metodología CML 2001, para el CB. La información reportada a continuación, corresponde a las etapas consideradas en el ACV de un sistema de BC con geointercambio (ver Figura 5.1) y la contribución porcentual respecto al total de impactos se puede observar en la Figura 5.3.

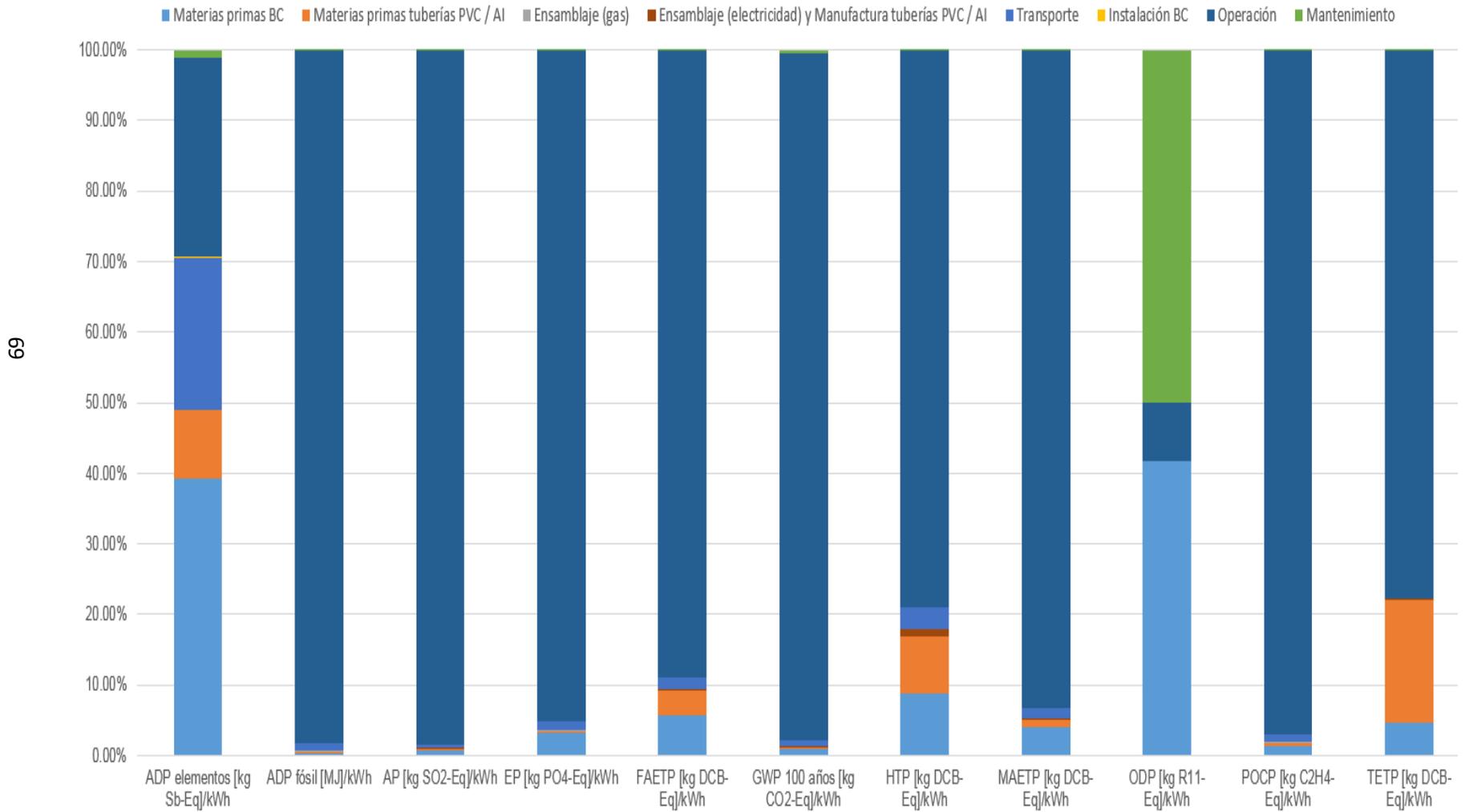
Tras la EICV, se ha identificado que alrededor del 80% de los impactos ambientales ocurren durante la operación de la BC, esto es debido a que el sistema energético nacional se basa en el uso de combustibles fósiles o fuentes convencionales. De manera similar, las materias primas empleadas para la manufactura de la BC y tuberías son otras de las principales cargas ambientales identificadas, con una contribución cercana al 15%.

Si la matriz energética nacional contara con tecnologías de ER durante la generación eléctrica, se disminuirían considerablemente las emisiones de GEI para la etapa de operación de la BC, sin embargo, se debe realizar una evaluación integral del sistema energético para identificar los impactos asociados a la fabricación de dichas tecnologías, ya que los materiales que componen las aspas (energía eólica), paneles solares (energía solar fotovoltaica) y presas (energía hidroeléctrica), solo por mencionar algunas, pueden contribuir en menor o mayor medida a la mitigación de GEI o incluso generar impactos de otra categoría, por este motivo se realizará una EICV para un MSF en un sistema residencial.

**Tabla 17 Evaluación de impactos ambientales para el caso base, normalizados a la unidad funcional.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Categorías de impacto	Materias primas BC	Materias primas tuberías PVC / AI	Ensamblaje (gas)	Ensamblaje (electricidad) y Manufactura tuberías PVC / AI	Transporte	Instalación BC	Operación	Mantenimiento
ADP elementos [kg Sb-Eq] / kWh	1.51E-07	3.72E-08	3.29E-11	4.55E-10	8.33E-08	3.95E-09	1.09E-07	1.03E-10
ADP fósil [MJ] / kWh	3.41E-02	1.79E-02	2.35E-03	3.04E-03	8.28E-02	5.05E-03	8.64	7.83E-03
AP [kg SO <sub>2</sub> -Eq] / kWh	3.42E-05	1.01E-05	1.14E-06	8.93E-07	2.04E-05	3.59E-06	4.55E-03	4.13E-06
EP [kg PO <sub>4</sub> -Eq] / kWh	2.03E-05	2.40E-06	2.26E-07	2.27E-07	7.41E-06	4.75E-07	6.19E-04	9.92E-07
FAETP [kg DCB-Eq] / kWh	4.86E-03	3.13E-03	3.43E-05	1.99E-05	1.32E-03	6.60E-05	7.70E-02	1.52E-04
GWP 100 años [kg CO <sub>2</sub> -Eq] / kWh	5.46E-03	1.60E-03	2.43E-04	1.50E-04	5.92E-03	3.41E-03	6.08E-01	6.57E-04
HTP [kg DCB-Eq] / kWh	1.93E-02	1.79E-02	6.48E-05	7.45E-05	6.64E-03	1.97E-04	1.75E-01	2.58E-03
MAETP [kg DCB-Eq] / kWh	1.43E+01	3.52	1.42E-01	8.03E-02	4.52	4.42E-01	3.29E+02	9.45E-01
ODP [kg R11-Eq] / kWh	2.82E-07	6.53E-11	7.26E-12	1.47E-11	9.25E-10	3.39E-07	5.57E-08	4.93E-11
POCP [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Eq] / kWh	4.19E-06	1.06E-06	4.18E-07	1.34E-07	3.28E-06	2.80E-07	2.95E-04	2.34E-07
TETP [kg DCB-Eq] / kWh	1.58E-04	6.03E-04	4.76E-07	6.96E-07	3.28E-06	2.29E-06	2.67E-03	1.10E-06

Figura 5.3 Contribución de las etapas del sistema al total de impactos, normalizados a la unidad funcional. Fuente: Elaboración propia.



## 5.4 Interpretación de resultados

Una vez que se ha llevado a cabo con éxito la EICV para cada fase, se procede a la identificación puntual de las cargas ambientales y la explicación de sus causas, dependiendo la categoría de impacto, de acuerdo con lo establecido en la ISO 14040-2006.

### 5.4.1 Potencial de agotamiento de recursos abióticos (ADP Elementos)

Se obtuvo un valor de  $3.85E-07$  [kg Sb-Eq]/kWh respecto al ADP Elementos, en donde la obtención de materiales para la fabricación del sistema contribuye en mayor medida con  $1.88E-07$  [kg Sb-Eq]/kWh, equivalentes al 50% total de los impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida. Esto corresponde en gran medida al consumo de molibdeno y cobre como materias primas, el primero es utilizado para la producción de aleaciones de acero y el segundo para el cableado eléctrico, tuberías y válvula de expansión. Aunado a esto, la fase de operación representa alrededor del 30% del agotamiento de elementos, principalmente por el cobre presente en el cableado de la red eléctrica.

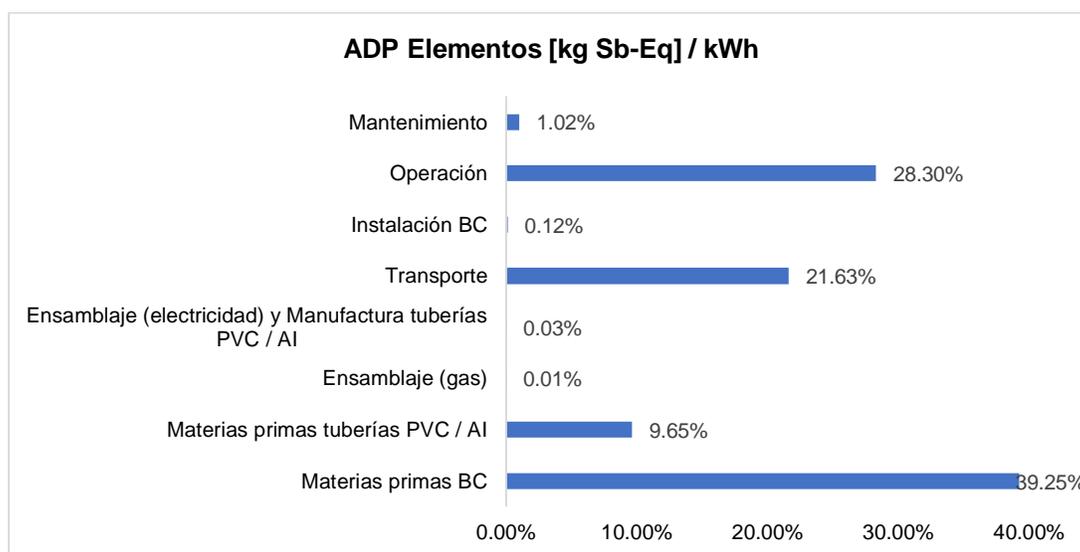


Figura 5.4 Potencial de agotamiento de recursos abióticos (ADP Elementos). Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.2 Potencial de agotamiento de recursos abióticos (ADP Fósil)

El potencial de ADP Fósil presenta un valor de 8.79 [MJ]/kWh. La operación domina prácticamente el total de los impactos, en este caso las contribuciones son producto del consumo de carbón, petróleo y gas natural durante la generación de electricidad en México.

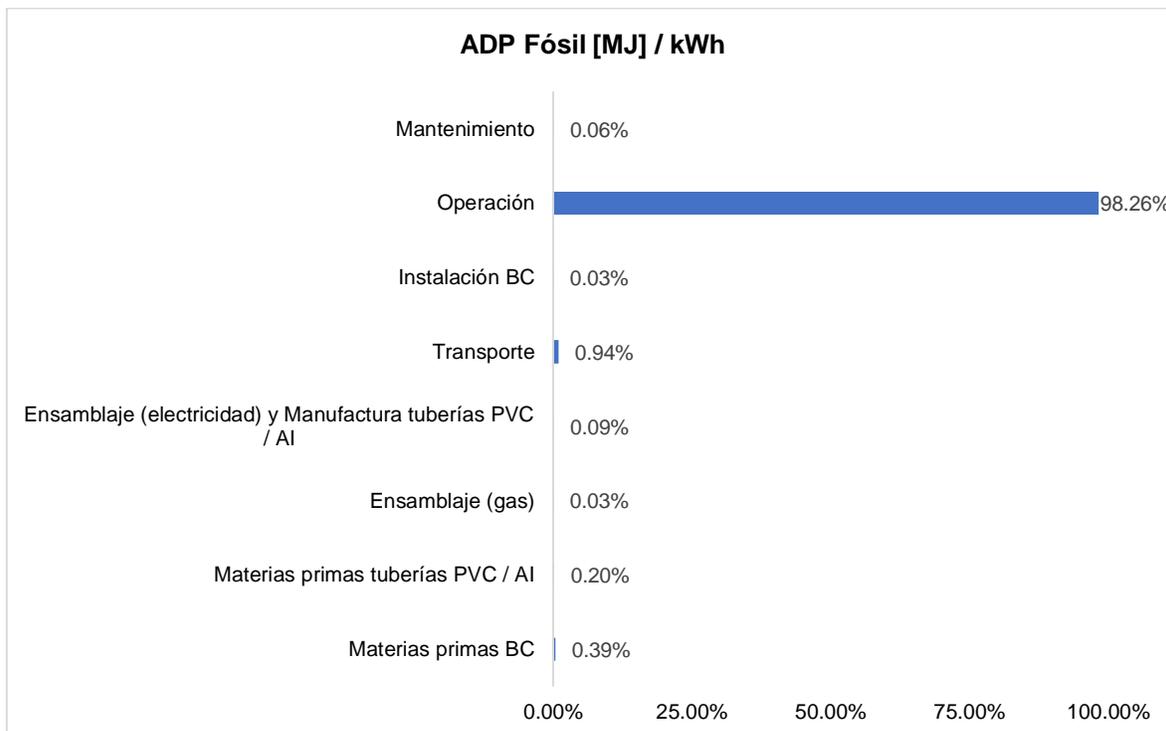


Figura 5.5 Potencial de agotamiento de recursos abióticos (ADP Fósil). Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.3 Potencial de acidificación (AP)

Nuevamente la etapa de operación presenta la mayor carga ambiental de acidificación con un total de 4.62E-03 [kg SO<sub>2</sub>-Eq]/kWh, principalmente por las emisiones de NO<sub>x</sub> generadas durante la operación de las centrales de cogeneración con gas natural y SO<sub>2</sub> producto de la combustión de carbón y gasolinas con alto contenido de azufre utilizados para la generación de electricidad.

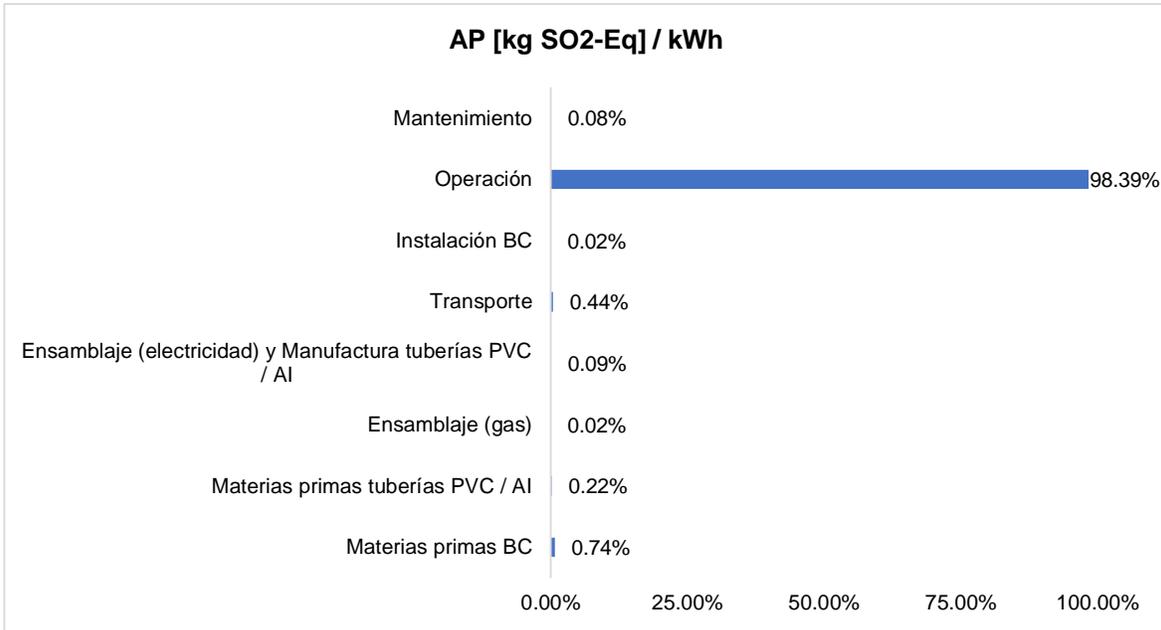


Figura 5.6 Potencial de acidificación (AP). Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.4 Potencial de eutrofización (EP)

El EP durante el ciclo de vida del sistema es de  $6.51E-04$  [kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-Eq]/kWh. Las emisiones de NO<sub>x</sub> derivadas de la operación de las plantas generadoras de electricidad son la principal causa.

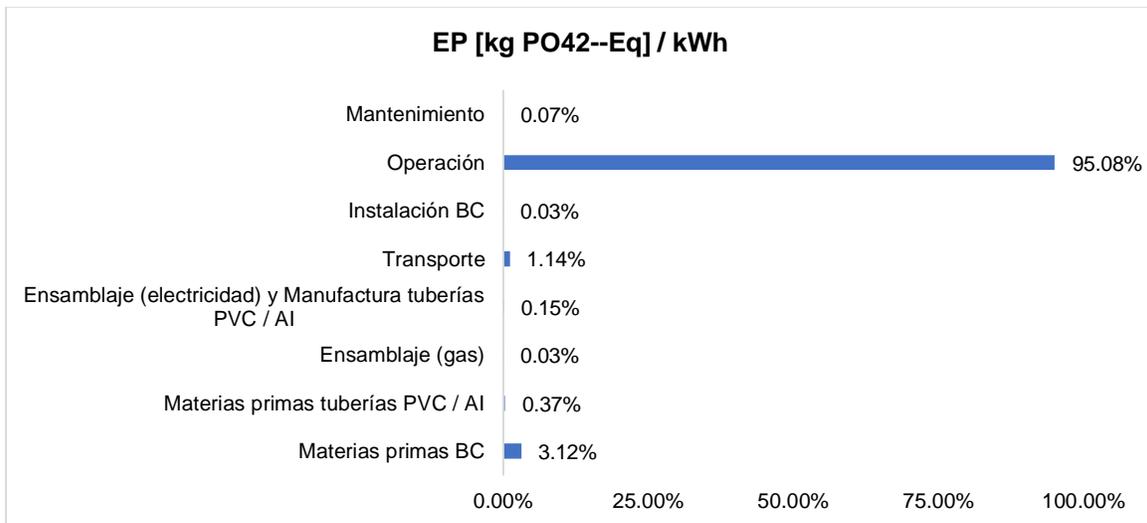


Figura 5.7 Potencial de eutrofización (EP). Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.5 Potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce (FAETP)

El FAETP es de  $8.66E-02$  [kg DCB-Eq]/kWh. Se estima que las emisiones de metales pesados al agua dulce se componen de vanadio (52%), berilio (20%) y níquel (13%) (E. Santoyo-Castelazo, Gujba, & Azapagic, 2011), lo anterior es producto de la operación de las plantas de generación de electricidad.

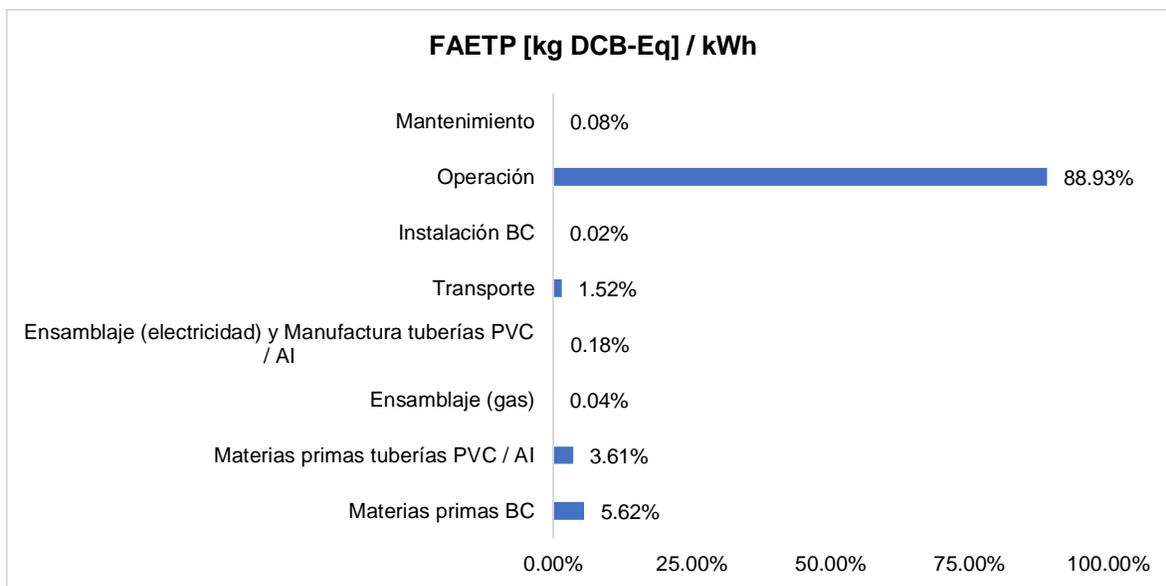


Figura 5.8 Potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce (FAETP). Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.6 Potencial de calentamiento global (GWP)

El 97% de los impactos que, desafortunadamente, contribuyen al calentamiento global ( $6.08E-01$  [kg CO<sub>2</sub>-Eq]/kWh), provienen de la generación de electricidad con combustibles fósiles. Hasta el año 2017, el uso de combustibles por el sector eléctrico fue de 69.7% gas natural, 15% combustóleo, 12.3% carbón 1.8% coque de petróleo y 1.2% diésel (SENER, 2018).

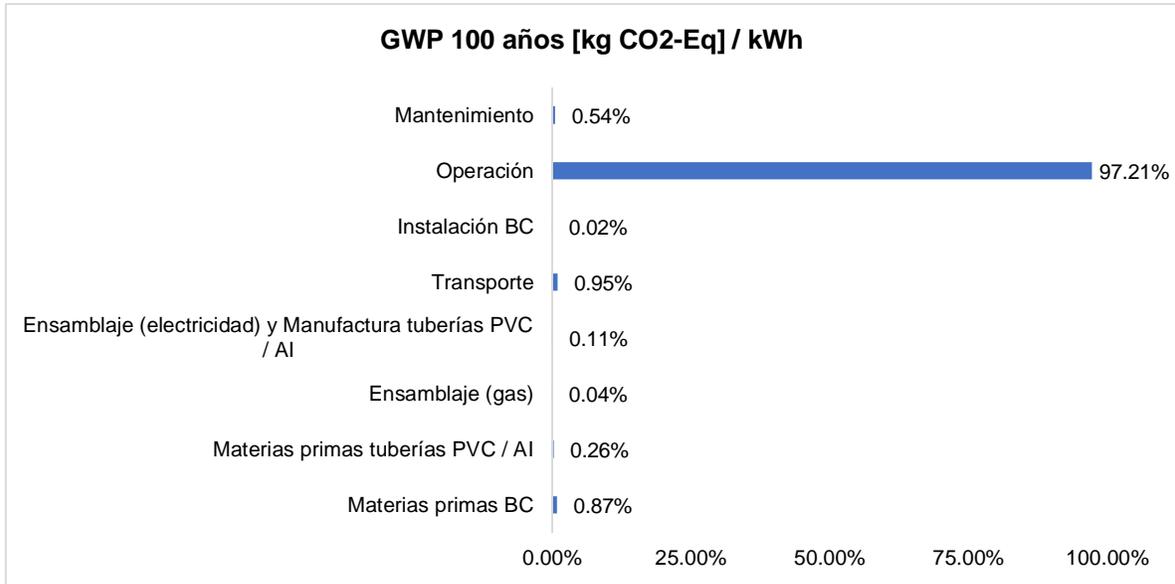


Figura 5.9 Potencial de calentamiento global. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.7 Potencial de toxicidad humana (HTP)

El HTP es de 2.22E-01 [kg DCB-Eq]/kWh, donde cerca del 80% corresponde a la operación del sistema, sin embargo, los materiales para la manufactura de la bomba e intercambiador representan contribuyen con un 8.7% y 8% de los impactos respectivamente, siendo el arsénico, níquel y fluoruro de hidrógeno las principales sustancias químicas emitidas al medio ambiente durante la generación de electricidad y manufactura del sistema.

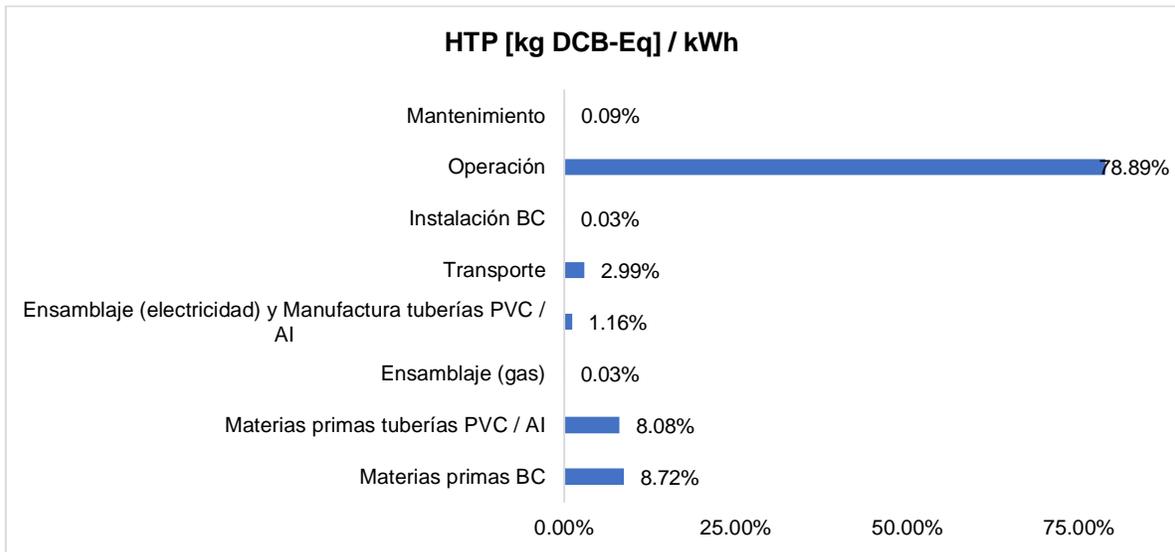


Figura 5.10 Potencial de toxicidad humana (HTP). Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.8 Potencial de ecotoxicidad acuática marina (MAETP)

El valor de MAETP es de 353 [kg DCB-Eq]/kWh, en donde la operación del sistema representa el 93% de los impactos totales. Este resultado guarda una estrecha relación con las emisiones al aire de fluoruro de hidrógeno y vanadio durante la generación de electricidad en centrales termoeléctricas que emplean combustibles fósiles como carbón y coque.

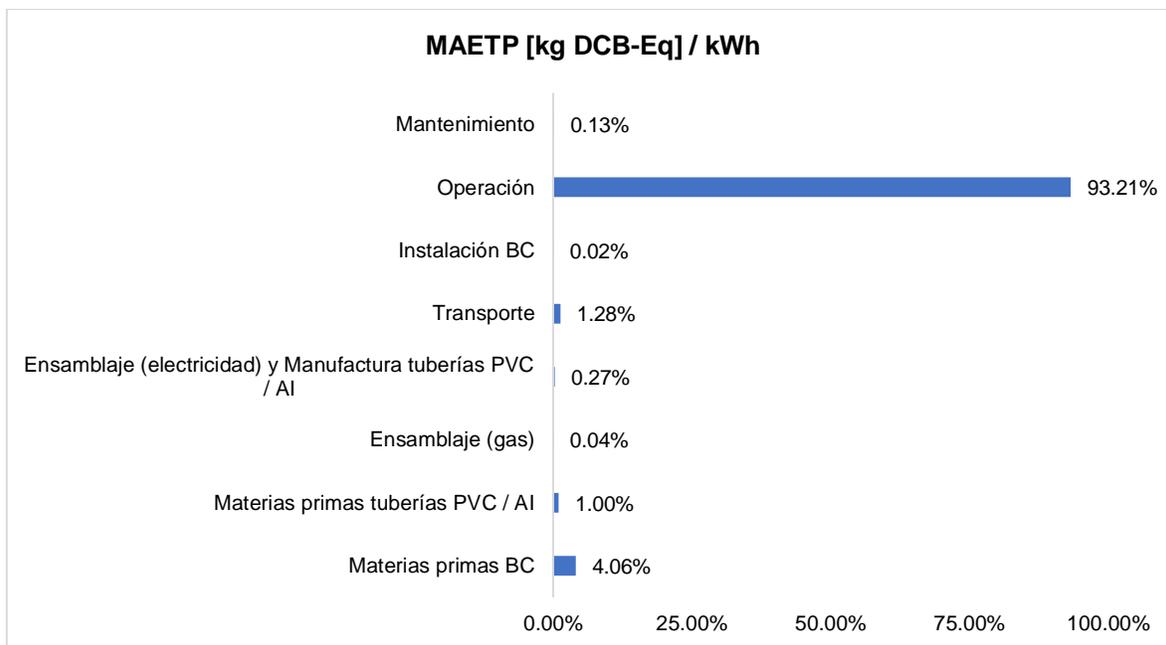


Figura 5.11 Potencial de ecotoxicidad acuática marina (MAETP). Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.9 Potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP)

Se estima un ODP de 6.78E-07 [kg R11-Eq]/kWh. En la Figura 5.3 se observa que las etapas de obtención de materias primas y mantenimiento equivalen al 90% del total de ODP. Esto es ocasionado por las sustancias emitidas a la atmósfera durante la producción del gas refrigerante R-134a, ya que éste último no contribuye al ODP.

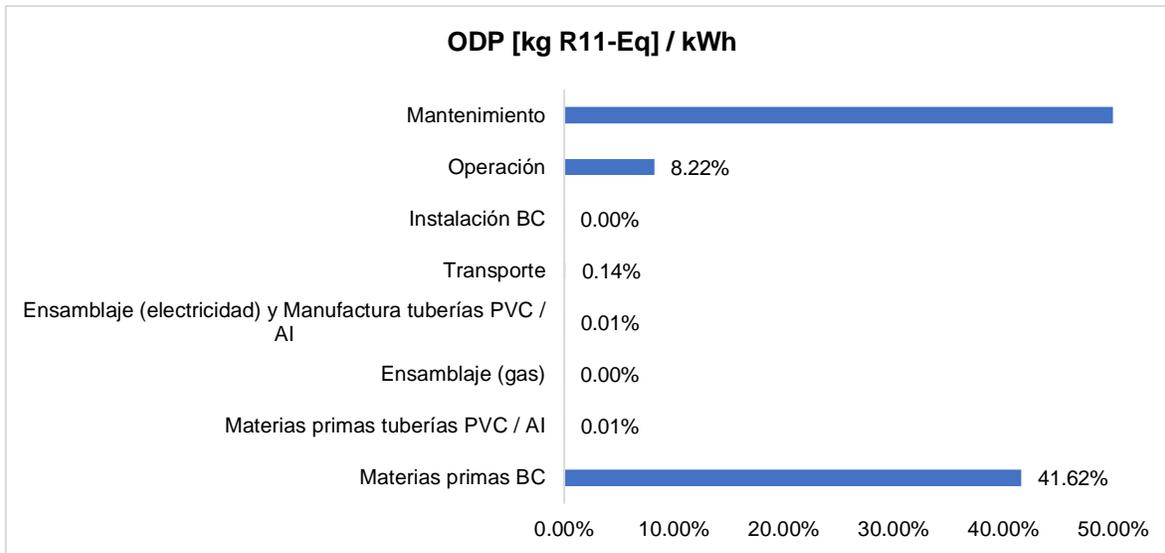


Figura 5.12 Potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP). Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.10 Potencial de creación de ozono fotoquímico (POCP)

El POCP a lo largo del ciclo de vida es de  $3.05E-04$  [kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-Eq]/kWh. Una vez más, la etapa de operación presenta la mayor carga ambiental (alrededor del 95% de las emisiones totales), producto de las emisiones de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y otros compuestos orgánicos volátiles derivadas de la combustión de combustibles fósiles durante la operación de las centrales carboeléctricas y de cogeneración.

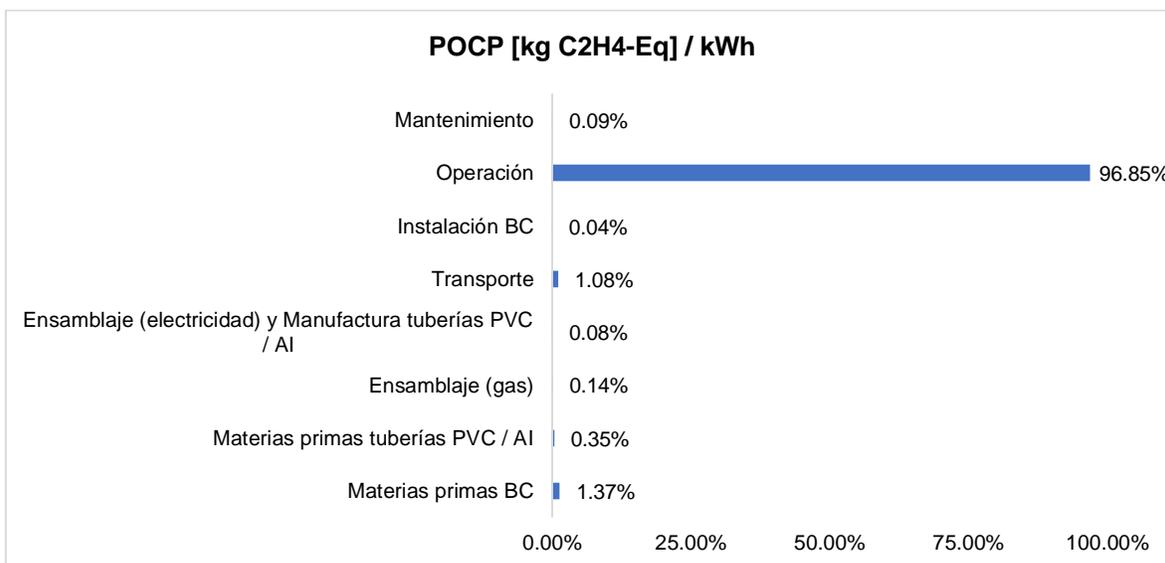


Figura 5.13 Potencial de creación de ozono fotoquímico (POCP). Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.11 Potencial de ecotoxicidad terrestre (TETP)

El total de TETP es de  $3.44E-03$  [kg DCB-Eq]/kWh. Alrededor del 78% de los potenciales impactos provienen de la operación de la planta y las emisiones de metales pesados como cromo, mercurio, níquel y vanadio asociadas a la generación de electricidad. Por otro lado, el 17.5% de los impactos se debe a emisiones de arsénico, cadmio, cobre, cromo, níquel y zinc que ocurren en los procesos metalúrgicos para la fabricación de los tubos de acero.

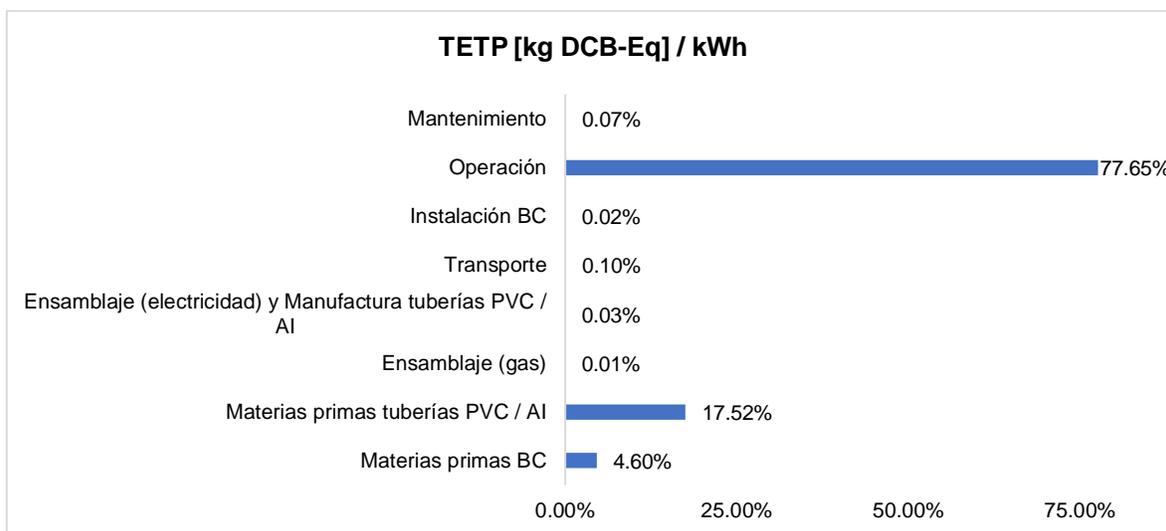


Figura 5.14 Potencial de ecotoxicidad terrestre (TETP). Fuente: Elaboración propia.

## 5.5 Análisis de sensibilidad de tuberías

Un sistema de geointercambio convencional en configuración vertical, se basa en intercambiadores de calor con tuberías de HDPE en forma de “U”, como se describió en el capítulo 3. Estos sistemas suelen tener una gran profundidad y un gran costo asociado y, al día de hoy, se han tenido avances en la optimización de los intercambiadores de calor con el subsuelo y un estudio realizado por Rubalcaba (2017), indica que un intercambiador de tubos concéntricos de PVC / Al puede ser de gran utilidad para sistemas de climatización con BC, ya que son capaces de

satisfacer la demanda de confort térmico para una vivienda, requiriendo una menor superficie.

El AST pretende evaluar los impactos que implica una variación entre los materiales que transfieren el calor. Las características y especificaciones del sistema se mantienen constantes para todas las fases a excepción de: las materias primas para tuberías, dado que para éste análisis de sensibilidad se sustituye el Al por HDPE; instalación, debido a que la cantidad de agujeros necesarios para lograr satisfacer la demanda de confort térmico incrementa con un intercambiador de HDPE y por ende el diésel consumido durante la perforación de agujeros aumenta, así como la cantidad de etilenglicol utilizado como fluido de trabajo; por último, el ensamblaje y la manufactura de las tuberías del intercambiador de calor varía de acuerdo con la cantidad de energía empleada durante el proceso de fabricación de los tubos.

Inicialmente el CB considera 3 intercambiadores de calor de tubos concéntricos de PVC / Al, mientras que el AST considera 17 intercambiadores de calor con tubos concéntricos de PVC / HDPE para lograr satisfacer la demanda de confort térmico. Se realizó el escalamiento para las cantidades materiales y energéticas requeridas para la manufactura de las tuberías, al igual que la cantidad de etilenglicol que va dentro de las mismas. La variación de impactos se muestra a continuación en la Tabla 18.

**Tabla 18 Comparación de impactos ambientales para el caso base y el análisis de sensibilidad de tuberías, normalizados a la unidad funcional.**

**Fuente: Elaboración propia.**

Categorías de impacto	Materias primas tuberías PVC / AI	Materias primas tuberías PVC / HDPE	Diferencia respecto al caso base	Instalación BC PVC / AI	Instalación BC PVC / HDPE	Diferencia respecto al caso base	Ensamblaje Sistema BC - Manufactura tuberías PVC / AI	Ensamblaje Sistema BC - Manufactura tuberías PVC / HDPE	Diferencia respecto al caso base
ADP elementos [kg Sb-Eq] / kWh	3.72E-08	1.75E-08	-53%	4.55E-10	2.57E-09	+466%	1.03E-10	1.51E-10	+47%
ADP fósil [MJ] / kWh	1.79E-02	6.92E-02	+287%	3.04E-03	1.72E-02	+465%	7.83E-03	1.14E-02	+46%
AP [kg SO2-Eq] / kWh	1.01E-05	2.17E-05	+114%	8.93E-07	5.05E-06	+466%	4.13E-06	6.03E-06	+46%
EP [kg PO4-Eq] / kWh	2.40E-06	6.29E-07	-74%	2.27E-07	1.29E-06	+467%	9.92E-07	1.45E-06	+46%
FAETP [kg DCB-Eq] / kWh	3.13E-03	2.87E-04	-91%	1.99E-05	1.12E-04	+465%	1.52E-04	2.22E-04	+46%
GWP 100 años [kg CO2-Eq] / kWh	1.60E-03	4.13E-03	+158%	1.50E-04	8.52E-04	+466%	6.57E-04	9.60E-04	+46%
HTP [kg DCB-Eq] / kWh	1.79E-02	1.93E-03	-89%	7.45E-05	4.23E-04	+468%	2.58E-03	3.77E-04	-85%
MAETP [kg DCB-Eq] / kWh	3.52	7.92E-01	-77%	8.03E-02	0.4545	+466%	9.45E-01	1.38E+00	+46%
ODP [kg R11-Eq] / kWh	6.53E-11	3.58E-11	-45%	1.47E-11	8.32E-11	+466%	4.93E-11	7.21E-11	+46%
POCP [kg C2H4-Eq] / kWh	1.06E-06	3.16E-06	+197%	1.34E-07	7.62E-07	+467%	2.34E-07	3.42E-07	+46%
TETP [kg DCB-Eq] / kWh	6.03E-04	1.44E-05	-98%	6.96E-07	3.95E-06	+468%	1.10E-06	1.61E-06	+46%

Los resultados obtenidos muestran que utilizar tuberías de HDPE puede llegar a incrementar hasta cinco veces los impactos totales asociados al sistema, siendo la cantidad de diésel quemado para la perforación de agujeros en el subsuelo, la principal fuente de emisiones durante la fase de instalación. Tras lo anterior se puede notar que incrementar el número de perforaciones tiene un impacto directamente proporcional a las emisiones totales del sistema (ver Figura 5.15).

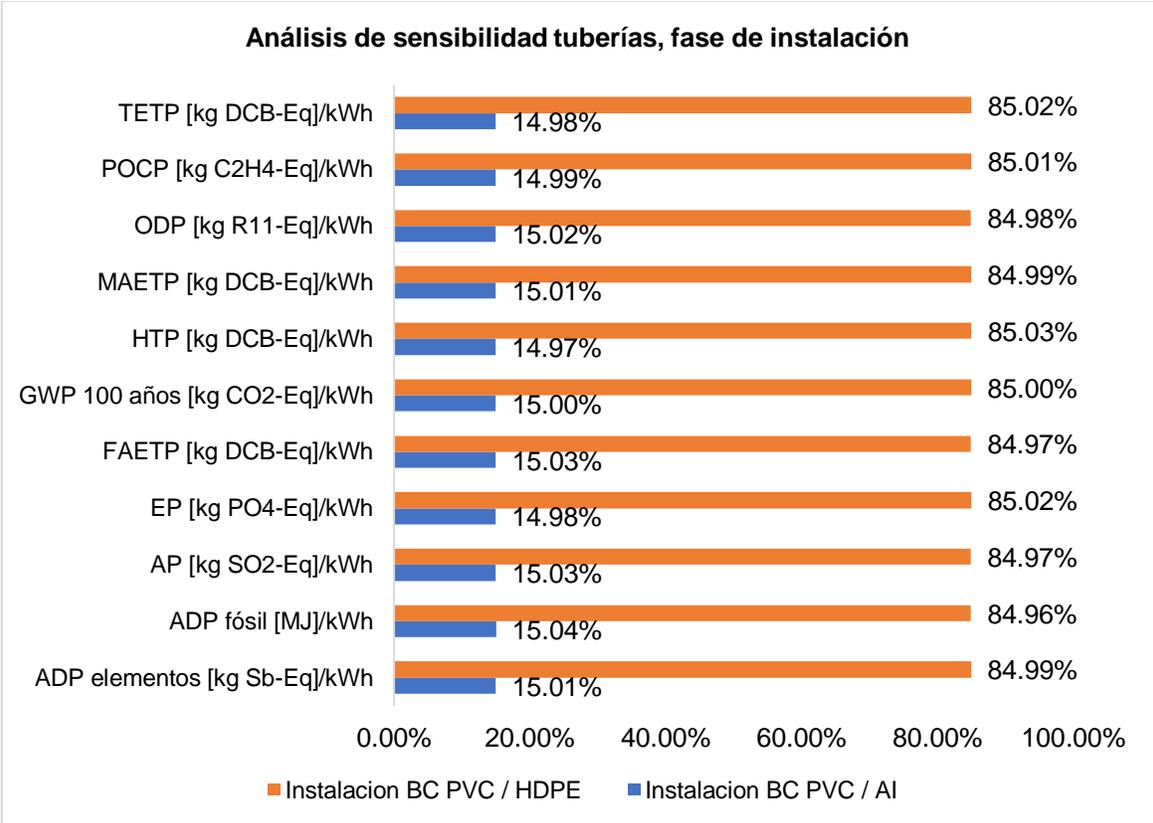


Figura 5.15 Análisis de sensibilidad de tuberías, fase de instalación. Fuente: Elaboración propia.

Otro de los rubros en los que se cuenta con mayores impactos para el caso de HDPE, ocurre durante la manufactura de las tuberías. A pesar de que el requerimiento energético para procesar un tubo de Al es ligeramente mayor que el de un tubo de HDPE, el volumen de material extruido para las tuberías de HDPE y PVC impacta de manera directa en las emisiones al ambiente que ocurren durante la generación de electricidad para moldear las tuberías, además de la emisión de compuestos orgánicos volátiles durante el procesamiento de los materiales. A pesar de esto, las tuberías de Al presentan valores elevados para la categoría de HTP

(ver Figura 5.16), producto de las emisiones que se generan durante la quema de combustibles fósiles, principalmente carbón, durante la fabricación de las láminas de acero.

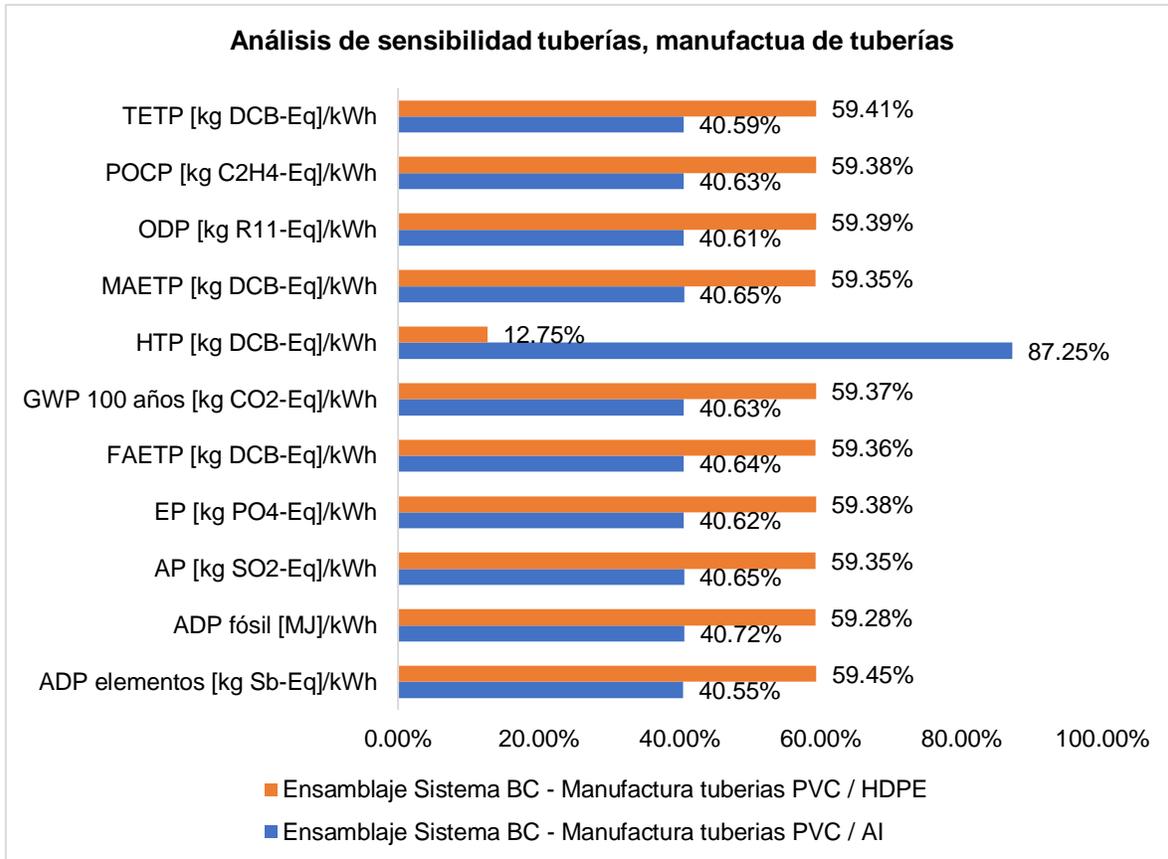


Figura 5.16 Análisis de sensibilidad de tuberías, manufactura de tuberías. Fuente: Elaboración propia.

Visto de una manera integral, es importante ponderar a qué tipo de impacto se le dará un mayor peso para la toma de decisiones, dado que la obtención de materias primas no guarda una relación proporcional en cuanto al requerimiento material. Por un lado, el ADP Elementos es aproximadamente el doble para la tubería de Al (ver Figura 5.17), lo que indica que el consumo de elementos como azufre, carbono, cromo, fósforo, hierro, manganeso, molibdeno, níquel y silicio tiene grandes repercusiones en el medio ambiente. Mientras que, por su parte, el ADP Fósil para la producción de tubos de HDPE presenta valores elevados porque se emplean productos derivados de hidrocarburos como el polietileno.

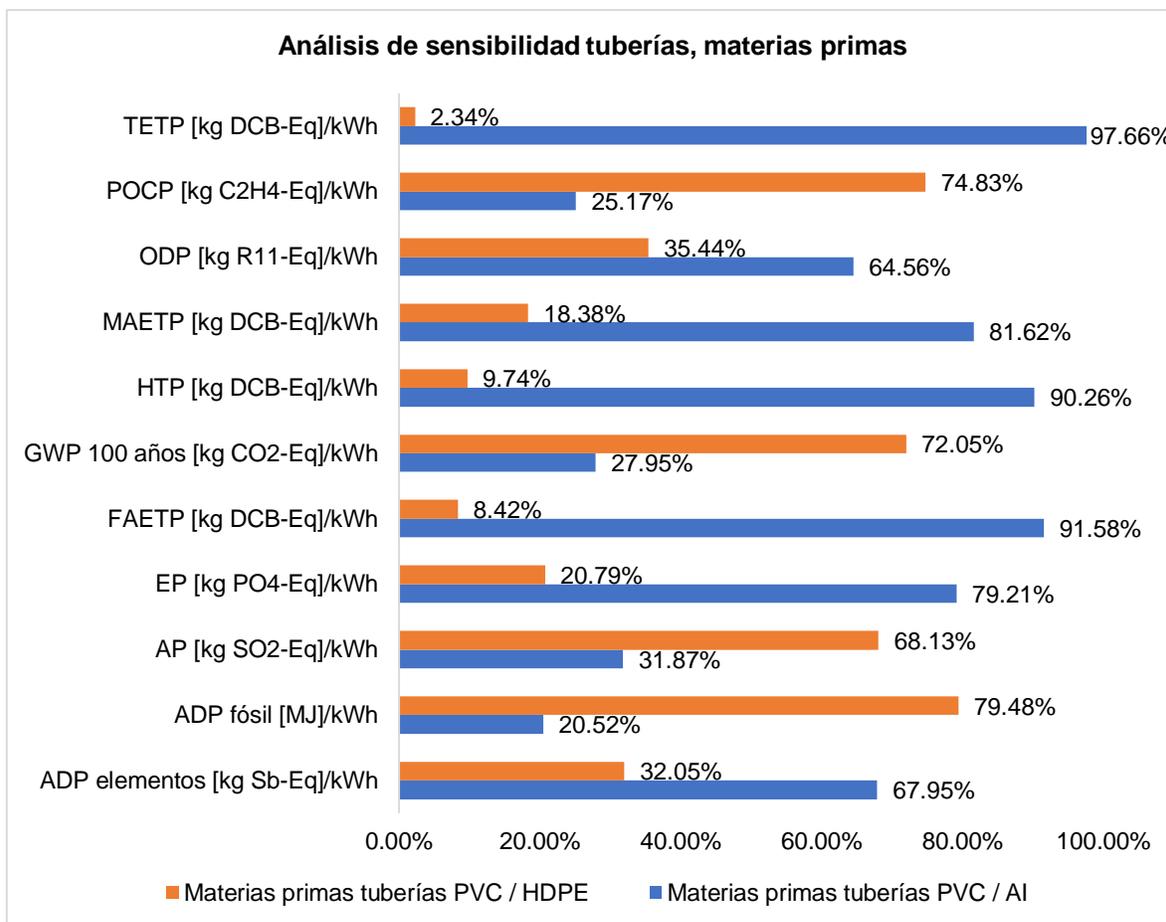


Figura 5.17 Análisis de sensibilidad de tuberías, materias primas. Fuente: Elaboración propia.

Las contribuciones ambientales en las categorías de AP, GWP y POCP por parte de las tuberías de HDPE se deben principalmente a los compuestos orgánicos volátiles que desprenden los solventes empleados durante la elaboración del PVC y HDPE<sup>15</sup>. Sin embargo, las tuberías de Al contribuyen en mayor proporción en 7 de las 11 categorías de impacto, como una consecuencia de los procesos metalúrgicos y sus implicaciones ambientales.

<sup>15</sup> La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos de Norte América, cuenta con una serie lineamientos y documentos para el control y reducción de emisiones de compuestos orgánicos volátiles para diferentes procesos que ocurren en la industria química.  
Fuente: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/control-techniques-guidelines-and-alternative-control-techniques>

## 5.6 Análisis de sensibilidad para la fuente energética

La operación del sistema se ve afectada por el uso de combustibles fósiles durante la generación de electricidad en el territorio nacional, esta etapa del ciclo de vida representa alrededor del 80% de los impactos totales. Dado que integrar fuentes renovables al sistema energético nacional es una labor compleja, se plantea un escenario que reduzca los impactos asociados al consumo energético de la BC mediante la instalación de un MSF de 3 kWp en el techo de una vivienda, siendo un sistema capaz de satisfacer los requerimientos energéticos que brinden confort térmico a una vivienda típica.

En este escenario se mantienen constantes todos los componentes excepto la fuente energética que alimenta al sistema, con la intención de evaluar las implicaciones de sustituir la alimentación de la red local por un MSF. A continuación, en la Tabla 19 se muestran los valores:

**Tabla 19 Comparación de impactos ambientales para el caso base y el análisis de sensibilidad para la fuente energética. Fuente: Elaboración propia.**

Categorías de impacto	Operación con planta 3 kWp	Operación BC (sistema energético mexicano)	Diferencia respecto al caso base
ADP elementos [kg Sb-Eq]	2.36E-06	1.09E-07	+2063%
ADP fósil [MJ]	6.38E-01	8.64	-93%
AP [kg SO2-Eq]	4.79E-04	4.55E-03	-89%
EP [kg PO4-Eq]	1.96E-04	6.19E-04	-68%
FAETP [kg DCB-Eq]	4.08E-02	7.70E-02	-47%
GWP 100 años [kg CO2-Eq]	5.73E-02	6.08E-01	-91%
HTP [kg DCB-Eq]	1.27E-01	1.75E-01	-27%
MAETP [kg DCB-Eq]	2.24E+02	3.29E+02	-32%
ODP [kg R11-Eq]	9.68E-09	5.57E-08	-83%
POCP [kg C2H4-Eq]	5.01E-05	2.95E-04	-83%
TETP [kg DCB-Eq]	6.43E-04	2.67E-03	-76%

Los resultados obtenidos muestran que el MSF tiene grandes implicaciones ambientales en cuanto al ADP Elementos. El panel fotovoltaico afecta en gran medida el agotamiento de recursos minerales por la plata utilizada para la fabricación de las celdas y el aluminio empleado en el marco del módulo. Otro componente que contribuye a esta categoría de impacto es el inversor, debido a la utilización de cobre, oro, estaño y acero para su manufactura.

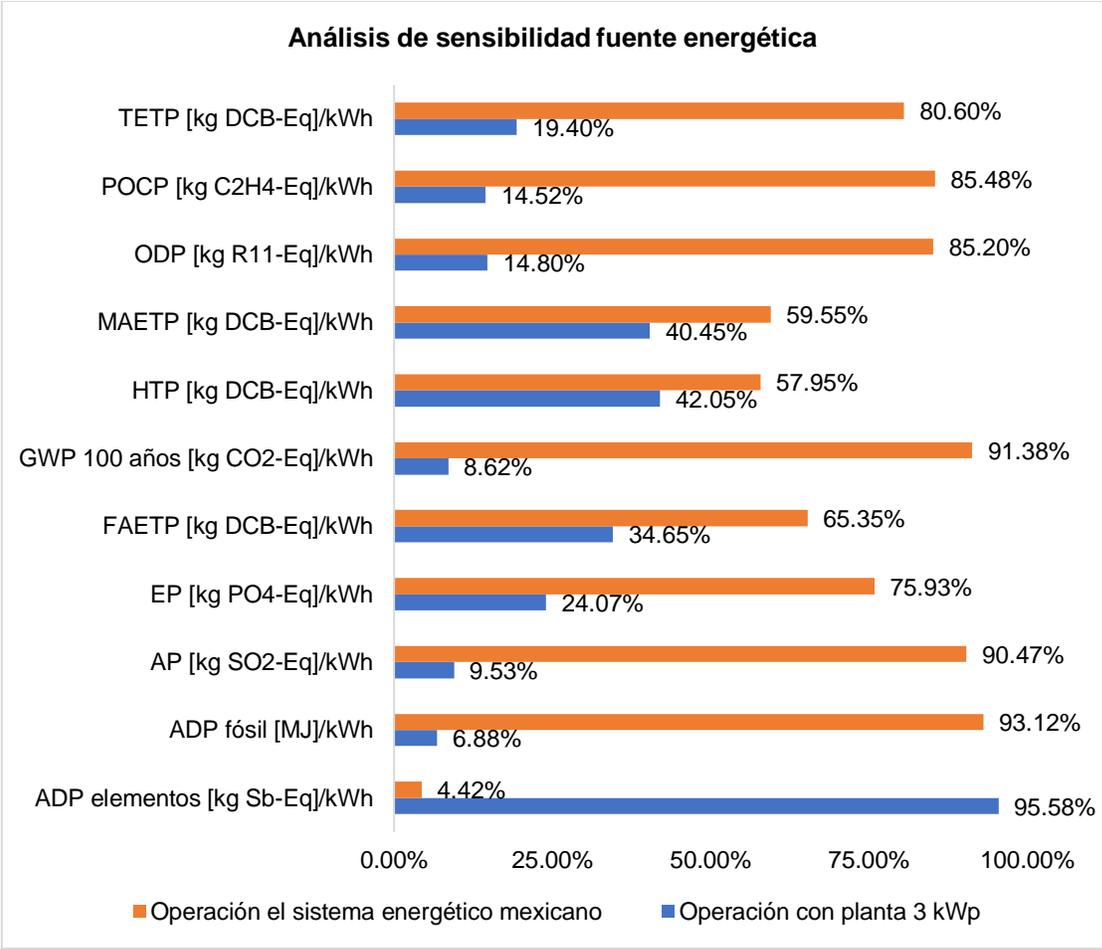


Figura 5.18 Análisis de sensibilidad para la fuente energética. Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que el tiempo de vida del MSF es de 30 años y tomando en cuenta esta consideración, los beneficios que brinda utilizar una planta solar fotovoltaica en vez de una conexión al sistema energético nacional, considerando la matriz energética actual, y al extender el tiempo de vida del sistema BC, se traduce en una reducción del 10-15% adicional a los valores reportados en la tabla 19.

## 6 Conclusiones y recomendaciones

Los resultados obtenidos en este estudio de ACV, muestran que alrededor del 80% de los impactos ambientales ocasionados por el uso de un sistema de BC con geointercambio capaz de satisfacer la demanda de confort térmico para una vivienda en México, ocurren durante la fase de operación del dispositivo. A pesar de que el uso y aprovechamiento de los RGSBE son una solución que contribuye a la EE y al desarrollo sostenible al reducir la demanda energética y brindar una mejor calidad de vida, existe una gran cantidad de emisiones asociadas a la operación del dispositivo debido a la emisión de aproximadamente  $6.08E-01$  [kg CO<sub>2</sub>-Eq] / kWh durante el ciclo de vida de la tecnología.

Diversos estudios han comparado el desempeño que presentan las BC fuente aire y fuente suelo para la climatización de espacios, siendo las de fuente suelo las que presentan un ahorro energético durante la operación del sistema, motivo por el cual estos dispositivos son considerados como una solución atractiva para satisfacer la demanda de confort térmico en edificaciones. Sin embargo, la optimización de un sistema de climatización con intercambio de energía térmica con el subsuelo es un campo que no ha sido del todo estudiado debido a que es necesaria la evaluación integral de proyectos de este tipo, por ejemplo la variación de materiales que componen los intercambiadores de calor y la integración de sistemas híbridos de generación asistida con almacenamiento de energía térmica y eléctrica, campos que van más allá del ahorro energético y económico y, que comienzan a cobrar mayor relevancia en los nuevos códigos de construcción y edificaciones sostenibles.

Dado que la operación del sistema guarda una estrecha relación con la manera en que se genera la electricidad en el país, se plantea un escenario en el que se instala un MSF de 3 kWp capaz de satisfacer la demanda energética del sistema, identificado que se reducen hasta un 91% de emisiones de GEI asociadas a la fase de operación. Visto de manera general, es posible reducir los impactos ambientales que se atribuyen a la quema de combustibles fósiles durante la generación de electricidad, no obstante, el agotamiento de recursos minerales puede verse afectado gravemente durante la manufactura de las celdas del MSF.

Los sistemas convencionales de BC con geointercambio cuentan con intercambiadores de calor contruidos con tubos de HDPE que son instalados en configuración vertical en forma de "U". De acuerdo con la literatura, la optimización de esta configuración ha demostrado que al utilizar tubos de AI se incrementa el COP y se favorece la transferencia de calor con el subsuelo. En este sentido, se plantea un escenario en el que se instala un sistema de BC con un intercambiador vertical de tubos concéntricos de PVC / AI y otro con PVC / HDPE, encontrando que para las fases de instalación y fabricación del intercambiador de calor con PVC / HDPE incrementan considerablemente todas las categorías de impacto (excepto el HTP durante la manufactura de las tuberías, a causa de los procesos metalúrgicos para la obtención del AI) debido a la cantidad de diésel utilizado durante la perforación de agujeros en el subsuelo, el aumento de la demanda energética para procesar un mayor volumen de material y principalmente al desprendimiento de compuestos orgánicos volátiles durante el proceso de extrusión. En contraste y como una consecuencia de los procesos metalúrgicos durante la fase de obtención de las materias primas para la elaboración de las tuberías, predominan los impactos ambientales para el AI en las categorías de ADP elementos, EP, FAETP, HTP, MAETP, ODP y TETP.

Reconociendo la importancia que tiene reducir la demanda energética y emisión de GEI en las ciudades, el presente estudio pretende informar a quienes toman las decisiones sobre los posibles impactos ambientales que se generan durante la manufactura, uso y disposición final de sistemas de climatización como las BC de fuente suelo.

Se recomienda al sector de medio ambiente robustecer los Planes de Residuos de Manejo Especial y al sector energético continuar con el despliegue de tecnologías bajas en carbono en edificaciones, previsto en documentos de planeación como el *"Mapa de Ruta Tecnológica: Usos Directos del Calor Geotérmico"* y proyectos como el *"Proyecto de Eficiencia y Sustentabilidad Energética en Municipios"*, que buscan reducir la demanda energética y favorecer el desarrollo social en municipios.

## 7 Bibliografía

- Abusoglu, A., & Sedeeq, M. S. (2013). Comparative exergoenvironmental analysis and assessment of various residential heating systems. *Energy & Buildings*, 62, 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.024>
- Azapagic, A. (2010). *Sustainable Development in Practice, Case Studies for Engineers and Scientist*. Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626777>
- Baldasano, J. M., Jiménez, P., & Parra, R. (2005). *Estimate of energy consumption and CO2 emission associated with the production, use and final disposal of PVC, HDPE, PP, ductile iron and concrete pipes*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Baumann, H., & Tillman, A.-M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA*. Studentlitteratur, Lund.
- Blum, P., Hellweg, S., Bayer, P., Saner, D., Juraske, R., & Ku, M. (2010). Is it only CO<sub>2</sub> that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems, 14, 1798–1813. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.002>
- Brumbaugh, J. E. (2004). *HVAC Fundamentals: Air-Conditioning, Heat Pumps and distribution Systems*. John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). *Thermodynamics. An Engineering Approach*. The McGraw-Hill.
- CEPAL. (2018). *Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de México, 2018*. Comisión Económica para América Latina y del Caribe. Naciones Unidas. Retrieved from [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43612/1/S1800496\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43612/1/S1800496_es.pdf)
- CGC. (2010). *Design and Installation of Residential Ground Source Heat Pump Systems.pdf*. Canadian GeoExchange Coalition.
- Chiasson, A. D. (2016). *Geothermal heat pump and heat engine systems: Theory and practice*. Wiley. John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom.
- Chiavetta, C., Tinti, F., & Bonolia, A. (2011). Comparative life cycle assessment of renewable energy systems for heating and cooling. *Procedia Engineering*, 21, 591–597. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2054>
- Chwieduk, D. (2012). *Solar-assisted heat pumps*. In: *Comprehensive renewable energy*.
- Conde, C. (2011). *México y el cambio climático global*. Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- DOF. (2015). *Ley de Transición Energética*. Diario Oficial de la Federación. Retrieved from <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LTE.pdf>
- DOF. (2018). *Ley General de Cambio Climático*. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
- Energy-Saving-Trust. (2007). Domestic Ground Source Heat Pumps: Design and installation of closed-loop systems – A guide for specifiers, their advisors and potential users, 22. Retrieved from [https://www.icax.co.uk/pdf/Domestic\\_Ground\\_Source\\_Heat\\_Pumps\\_Design\\_Installation.pdf](https://www.icax.co.uk/pdf/Domestic_Ground_Source_Heat_Pumps_Design_Installation.pdf)
- Genkinger, A., Dott, R., & Afjei, T. (2012). Combining heat pumps with solar energy for domestic hot water production, 30, 101–105. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.013>
- Glassley, W. E. (2010). *Geothermal Energy: Renewable Energy ad the Environment*. CRC Press. Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL.
- Goodman. (2013). *TECHNICAL MANUAL \* PH 14 SEER R-410A Package Heat Pump Units*. Goodman Manufacturing Company, L.P. Retrieved from <https://www.hvac.com/media/manuals/technical/GOODMANGPH14H.pdf>
- Grassi, W. (2018). *Heat Pumps, Fundamentals and Applications*. Springer International Publishing AG. Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62199-9>
- Greening, B., & Azapagic, A. (2012). Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK. *Energy*, 39(1), 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.028>
- GSHPA. (2018). Ground Source Heat Pump Association Ground Source Heat Pumps – Commercial. Retrieved from [https://www.gshp.org.uk/Ground\\_Source\\_Heat\\_Pump.html](https://www.gshp.org.uk/Ground_Source_Heat_Pump.html)
- Guinée, J. B. (2011). *Handbook on Life Cycle Assessment, Operational Guide to the ISO Standards*. Kluwer Academic Publishers.
- Hauschild, M. Z., & Huijbregts, M. A. J. (2015). *Life Cycle Impact Assessment*. Springer International Publishing AG. Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9744-3>
- Heikkilä, K. (2008). Environmental evaluation of an air-conditioning system supplied by cooling energy from a bore-hole based heat pump system, 43(May 2004), 51–61.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.027>

- Hischier, R., Weidema, B., Althaus, H., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., ... Nemecek, T. (2010). *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Hischier, R., Weidema, B., & Bauer, C. (2013). *Data quality guideline for the ecoinvent database version 3*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Hoffman, L., & Schmidt, A. (1997). *Life Cycle Assessment, A guide to approaches, experiences and information sources*. European Environment Agency.
- Hou, Q., Mao, G., Zhao, L., & Du, H. (2015). Mapping the scientific research on life cycle assessment : a bibliometric analysis. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0846-2>
- Huang, B., & Mauerhofer, V. (2016). Life cycle sustainability assessment of ground source heat pump in Shanghai, China. *Journal of Cleaner Production*, 119, 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.048>
- IEA. (2007). *Renewables for Heating and Cooling*. International Energy Agency. Retrieved from [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Renewable\\_Heating\\_Cooling\\_Final\\_WEB.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Renewable_Heating_Cooling_Final_WEB.pdf)
- IEA. (2013). *Transition to sustainable buildings: Strategies and opportunities to 2050*. Oecd (Vol. 9789264202). International Energy Agency. <https://doi.org/10.1787/9789264202955-en>
- IEA. (2014). *Heating without global warming: Market developments and policy considerations for renewable heat*. International Energy Agency. Retrieved from [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/FeaturedInsight\\_Heating\\_WithoutGlobalWarming\\_FINAL.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/FeaturedInsight_Heating_WithoutGlobalWarming_FINAL.pdf)
- IEA. (2016). *Renewable Energy Medium-Term Market Report 2016: Market Analysis and Forecast to 2021*. International Energy Agency. <https://doi.org/10.1787/9789264188471-en>
- IEA. (2017a). *Energy Efficiency Indicators: Highlights*. International Energy Agency. Retrieved from [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyEfficiencyHighlights\\_2017.PDF](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyEfficiencyHighlights_2017.PDF)
- IEA. (2017b). *Energy Technology Perspectives 2017*. International Energy Agency. [https://doi.org/10.1787/energy\\_tech-2014-en](https://doi.org/10.1787/energy_tech-2014-en)
- IEA. (2017c). *World Energy Outlook*. International Energy Agency.

- IEA. (2018). *Renewable heat policies*. International Energy Agency. Retrieved from [http://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/Renewable\\_Heat\\_Policies.pdf](http://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/Renewable_Heat_Policies.pdf)
- IGSHPA. (2017). *Closed-Loop / Geothermal Heat Pump Systems, Design and Installation Standards 2017*. International Ground Source Heat Pump Association. 1201 S. Innovation Way Drive, Suite 400, Oklahoma State University, Stillwater, OK 74074. Retrieved from [https://igshpa.org/sites/default/files/inline-files/2017\\_IGSHPA\\_Standards\\_restricted.pdf](https://igshpa.org/sites/default/files/inline-files/2017_IGSHPA_Standards_restricted.pdf)
- Ioannis, G. (2014). *Environmental Performance Assessment of Heat Pumps*. International Hellenic University.
- IPCC. (1995). *Climate Change 1995, The Science of Climate Change*. (J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, & K. Maskel, Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Retrieved from [https://www.ipcc.ch/ipccreports/sar/wg\\_i/ipcc\\_sar\\_wg\\_i\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/ipccreports/sar/wg_i/ipcc_sar_wg_i_full_report.pdf)
- IPCC. (1996). *Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/paper-i-sp.pdf>
- IPCC. (2014). *Resumen para responsables de políticas. En: Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. (S. B. Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum & T. Z. y J. C. M. (eds. . P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Retrieved from [www.ipcc.ch/5Cnwww.mitigation2014.org](http://www.ipcc.ch/5Cnwww.mitigation2014.org)
- ISO. (1997). *ISO 14040:1997, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2006a). *ISO 14040:2006, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2006b). *ISO 14044:2006, Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. International Organization for Standardization.
- Kim, J., Hong, T., Chae, M., Koo, C., & Jeong, J. (2015). An environmental and economic assessment for selecting the optimal ground heat exchanger by considering the

- entering water temperature. *Energies*, 8(8), 7752–7776.  
<https://doi.org/10.3390/en8087752>
- Koroneos, C. J., & Nanaki, E. A. (2017). Environmental impact assessment of a ground source heat pump system in Greece. *Geothermics*, 65, 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.08.005>
- Li, M., & Smith, T. M. (2012). *Life Cycle Assessment of Residential Heating and Cooling Systems in Minnesota*. University of Minnesota.
- Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66–93. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
- Marinelli, S., Lolli, F., Gamberini, R., & Rimini, B. (2018). Life Cycle Thinking (LCT) applied to residential heat pump systems: A critical review. *Energy & Buildings*.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.035>
- Martínez, E. (2017). *Análisis de Ciclo de Vida de una planta solar fotovoltaica en México*. Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/14190/tesis.pdf?sequence=1>
- Matthews, H. S., Hendrickson, C. T., & Matthews, D. H. (2015). *Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions That Matter*. Retrieved from <https://www.lcatextbook.com/>
- Mustafa Omer, A. (2008). Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 344–371.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.003>
- Nitkiewicz, A., & Sekret, R. (2014). Comparison of LCA results of low temperature heat plant using electric heat pump , absorption heat pump and gas-fired boiler. *ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT*, 87, 647–652.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.032>
- Pahud, D. (2002). Geothermal energy and heat storage, 1–133. Retrieved from <http://repository.supsi.ch/3651/1/82-Pahud-2002-Lecture-notes-GEO.pdf>
- PE-International. (2009). *GaBi Education Handbook for Life Cycle Assessment ( LCA )*. PE International, Hauptstrasse 113-115, Leinfelden-Echterdingen, Germany.
- Reda, F. (2017). *Solar Assisted Ground Source Heat Pump Solutions: Effective Energy Flows Limate Management*. Springer International Publishing AG. Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49698-6>
- Ren, C., Deng, Y., & Cao, S. J. (2018). Evaluation of polyethylene and steel heat exchangers

- of ground source heat pump systems based on seasonal performance comparison and life cycle assessment. *Energy and Buildings*, 162, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.037>
- REN21. (2017). *Renewables 2017: Global status report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
- REN21. (2018). *Renewables 2018: Global status report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
- Rubalcaba, J. (2017). *Análisis y diseño de un intercambiador de calor geotérmico para aplicaciones en bombas de calor en Mexicali, B.C.* Mexicali, Baja California: Universidad Autónoma de Baja California.
- Russo, G., Anifantis, A. S., Verdiani, G., & Mugnozza, G. S. (2014). Environmental analysis of geothermal heat pump and LPG greenhouse heating systems. *Biosystems Engineering*, 127, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.08.002>
- Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H., & Azapagic, A. (2011). Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy*, 36(3), 1488–1499. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.018>
- Santoyo-Castelazo, E., Stamford, L., & Azapagic, A. (2014). Environmental implications of decarbonising electricity supply in large economies: The case of Mexico. *Energy Conversion and Management*, 85, 272–291. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.051>
- Santoyo-Gutiérrez, E., & Torres-Alvarado, I. (2010). *Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable*. Revista Digital Universitaria, Centro de Investigación en Energía UNAM. Retrieved from <http://www.revista.unam.mx/vol.11/num10/art95/art95.pdf>
- Sarlat, R. I. (2017). EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA REFORMA ENERGÉTICA EN MÉXICO: ENTRE LOS COMPROMISOS INTERNACIONALES Y LA REALIDAD NACIONAL. Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM.
- SEMARNAT. (2012). *Informe de la situación del medio ambiente en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved from [https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe\\_12/pdf/Cap3\\_suelos.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf)
- SEMARNAT. (2013). *NOM-161-SEMARNAT-2011*. Diario Oficial de la Federación. Retrieved from <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/DO3015.pdf>

- SENER. (n.d.). Glosario de Términos de Electricidad. Secretaría de Energía. Retrieved from [http://sie.energia.gob.mx/docs/glosario\\_elec\\_es.pdf](http://sie.energia.gob.mx/docs/glosario_elec_es.pdf)
- SENER. (2016). Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles Mas Limpios. *Secretaría de Energía*. Retrieved from [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/182202/20161110\\_1300h\\_Estrategia\\_CCTE-1.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/182202/20161110_1300h_Estrategia_CCTE-1.pdf)
- SENER. (2018a). Balance Nacional de Energía. Secretaría de Energía. Retrieved from [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energia\\_a\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance_Nacional_de_Energia_a_2017.pdf)
- SENER. (2018b). *Mapa de Ruta Tecnológica: Usos Directos del Calor*. Secretaría de Energía. Retrieved from [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/416191/MRT\\_UDCG\\_Final.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/416191/MRT_UDCG_Final.pdf)
- SENER. (2018c). *Prospectiva de petróleo crudo y petrolíferos 2018-2032*. Secretaría de Energía. Retrieved from [http://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PPP\\_2018\\_2032\\_F.pdf](http://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PPP_2018_2032_F.pdf)
- SENER. (2018d). *Reporte de Avances de Energías Limpias, Primer Semestre 2018*. Secretaría de Energía.
- UN. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future Acronyms and Note on Terminology Chairman 's Foreword. Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Retrieved from <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>
- UN. (1992a). CMNUCC. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Retrieved from [http://legal.un.org/avl/pdf/ha/ccc/ccc\\_s.pdf](http://legal.un.org/avl/pdf/ha/ccc/ccc_s.pdf)
- UN. (1992b). Declaración De Río. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Retrieved from [http://www.unesco.org/education/pdf/RIO\\_S.PDF](http://www.unesco.org/education/pdf/RIO_S.PDF)
- UN. (1995). Protocolo de Kyoto. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Retrieved from <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- UN. (2015a). Acuerdo de París. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Retrieved from [https://unfccc.int/files/meetings/paris\\_nov\\_2015/application/pdf/paris\\_agreement\\_spanish\\_.pdf](https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf)
- UN. (2015b). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Asamblea General de las Naciones Unidas. Retrieved from

- [http://unctad.org/meetings/es/SessionalDocuments/ares70d1\\_es.pdf](http://unctad.org/meetings/es/SessionalDocuments/ares70d1_es.pdf)
- UNDP. (2017). *Ground Source Heat Pumps (GSHP): A Guideline Report*. United Nations Development Programme (UNDP) and CEDRO. Retrieved from <http://www.cedro-undp.org/content/uploads/publication/170915023806776~GSHPFullReport.pdf>
- UNEP. (1998). *Economics of greenhouse Gas Limitations: Methodological Guidelines*. (K. Halsnaes, J. M. Callaway, & H. J. Meyer, Eds.) (Vol. 6). UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment, Riso National Laboratory, Denmark, 1998.
- UNEP. (2018). *Global Trends in Renewable Energy investment 2018*. Frankfurt School of Finance & Management and United Nations Environment Programme. Retrieved from <http://fs-unesp-centre.org/publications/global-trends-renewable-energy-investment-report-2018>
- UNEP, & SETAC. (2016). *Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators, Volume 1*. United Nations Environmental Programme (UNEP).
- WBCSD. (2006). *Eco-Efficiency Learning module*. World Business Council for Sustainable Development. Retrieved from <https://docs.wbcsd.org/2006/08/EfficiencyLearningModule.pdf>
- WEC. (2016). *World Energy Resources Geothermal | 2016*. World Energy Council. Retrieved from [https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources\\_Geothermal\\_2016.pdf](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Geothermal_2016.pdf)
- WEF. (2019). *Fostering Effective Energy Transition*. World Economic Forum. Retrieved from [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Fostering\\_Effective\\_Energy\\_Transition\\_2019.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Fostering_Effective_Energy_Transition_2019.pdf)

## Anexo I Software GaBi ®

La principal aplicación del software GaBi ® es para realizar estudios de ACV, ya que cuenta con más de 10,000 perfiles de inventario y adicionalmente permite integrar bases de datos como Ecoinvent para robustecer el nivel de detalle durante construcción de modelos. El software categoriza los impactos ambientales de acuerdo con la ISO 14040:2006, siendo una herramienta útil para el desarrollo y optimización de productos a través del eco-diseño, identificación de *hot spots* e integración de la cadena de valor. La estructura de GaBi ® consta de tres módulos, los cuales son elementos esenciales durante el desarrollo de un proyecto de ACV a través de planos, procesos y flujos.

Los flujos representan la información más relevante para que se pueda llevar a cabo una simulación. Los flujos son interconectados mediante líneas de proceso y se caracterizan por sus valores másicos y energéticos, siendo estas cantidades de entrada y salida las que determinan la contribución para cada categoría de impacto.

GLO: market for steel, low-alloyed ecoinvent [2410:Manufacture of basic iron and steel] -- BD Procesos

Objeto Editar Visualizar Ayuda

Nombre GLO market for steel, low-alloyed

Parámetros

Parámetro	Fórmula	Valor	Mínimo	Máximo	Desviaci	Coment
Parámetros						

ACV ACC: -6,46 EUR ACTT Documentación

Integridad Ningún dato

Entradas

Flujo	Magnitud	Cantidad	Unidad	M <sub>a</sub>	Desviaci	Origen	Comentario
Aluminium [Non renewable elements]	Mass	0,00198	kg	0 %	(Ningún dato)		
Anhydrite (Rock) [Non renewable resc]	Mass	7,4E-009	kg	0 %	(Ningún dato)		
Argon [Non renewable elements]	Mass	0,000936	kg	0 %	(Ningún dato)		
Barite, 15% in crude ore, in ground [Non renewable resources]	Mass	0,000413	kg	0 %	(Ningún dato)		
Basalt [Non renewable resources]	Mass	0,000173	kg	0 %	(Ningún dato)		
Bentonit clay [Non renewable resourso]	Mass	0,00849	kg	0 %	(Ningún dato)		
Biomass (MJ) [Renewable energy resc]	Energy (net calor)	0,398	MJ	0 %	(Ningún dato)		
Borax [Non renewable resources]	Mass	7,87E-008	kg	0 %	(Ningún dato)		

Salidas

Flujo	Magnitud	Cantidad	Unidad	M <sub>a</sub>	Desviaci	Origen	Comentario
GLO: steel, low-alloyed [allocata]	Mass	1	kg	X 0 %	(Ningún dato)		
1,1,1-Trichloroethane [Halogenated o]	Mass	1,86E-020	kg	0 %	(Ningún dato)		
1,1,1-Trichloroethane [Halogenated o]	Mass	3,9E-010	kg	0 %	(Ningún dato)		
1-Butanol [Organic emissions to fresh]	Mass	6,24E-009	kg	0 %	(Ningún dato)		
1-Butanol [Group NMVOC to air]	Mass	1,87E-012	kg	0 %	(Ningún dato)		
1-Pentanol [Organic emissions to fresh]	Mass	2,04E-012	kg	0 %	(Ningún dato)		
1-Pentanol [Group NMVOC to air]	Mass	8,52E-013	kg	0 %	(Ningún dato)		
1-Pentene [Organic emissions to fresh]	Mass	1,54E-012	kg	0 %	(Ningún dato)		
1-Pentene [Group NMVOC to air]	Mass	2,03E-011	kg	0 %	(Ningún dato)		
1-Propanol [Group NMVOC to air]	Mass	1,64E-011	kg	0 %	(Ningún dato)		
2,4-Dichlorophenol [Halogenated orga]	Mass	4,12E-012	kg	0 %	(Ningún dato)		
2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-C	Mass	8,56E-009	kg	0 %	(Ningún dato)		
2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-C	Mass	2,31E-011	kg	0 %	(Ningún dato)		

System: Ninguna m... Ecoinvent Última modificación: System, 30/04/2015 17:00:... GUID: {802E56CF-D0DB-4FC5-9F52-D0DEB8007C5E}

Composición másica para un flujo de acero de baja aleación. Fuente: Elaboración propia.

Los procesos o etapas del sistema se definen mediante entradas y salidas, aquí se integran los componentes del inventario de ciclo de vida, de igual manera en esta ventana se especifican las emisiones asociadas al proceso, así como aspectos económicos.

Materiales para manufactura de BC <u-so> [Processes] -- BD Procesos

Objeto Editar Visualizar Ayuda

Nombre: *Material* Materiales para manufactura de BC Fuente: u-so - Unidad de proceso, operac

Parámetros: Fórmula Valor Mínimo Máximo Desviaci Comen

ACV ACC: 0 EUR ACTT Documentación

Integridad: Ningún dato

**Entradas**

Flujo	Magnitud	Cantidad	Unidad	Má Desviaci	Origen	Comentario
GLO: cast iron [allocatable product]	Mass	6,37E-005	kg	X 0 %	(Ningún dato)	
GLO: copper [allocatable product]	Mass	5,63E-005	kg	X 0 %	(Ningún dato)	
GLO: lubricating oil [allocatable product]	Mass	6,23E-006	kg	X 0 %	(Ningún dato)	
GLO: polyvinylchloride, bulk polymerised [allocatable product]	Mass	1,06E-005	kg	X 0 %	(Ningún dato)	
GLO: refrigerant R134a [allocatable product]	Mass	2,73E-005	kg	X 0 %	(Ningún dato)	
GLO: reinforcing steel [allocatable product]	Mass	0,000867	kg	X 0 %	(Ningún dato)	
GLO: steel, low-alloyed [allocatable product]	Mass	0,000142	kg	X 0 %	(Ningún dato)	
GLO: tube insulation, elastomere [allocatable product]	Mass	2,83E-005	kg	X 0 %	(Ningún dato)	

**Salidas**

Flujo	Magnitud	Cantidad	Unidad	Má Desviaci	Origen	Comentario
Fase de manufactura BC [Materi	Mass	0,0012	kg	X 0 %	(Ningún dato)	

Flujos de entrada al proceso de manufactura de BC. Fuente: Elaboración propia.

Los planos describen el sistema analizado mediante la unión de los procesos, estos representan de manera gráfica el servicio o producto a ser evaluado. Es aquí donde se conectan los procesos.



Plano del sistema BC. Fuente: Elaboración propia.