REPORTE DE INTELIGENCIA TECNOLÓGICA

USOS DIRECTOS DEL CALOR GEOTÉRMICO

SENER
SECRETARÍA DE ENERGÍA

FONDO DE SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA

IMP
INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 9

1.1 Objetivo 10

1.2 Alcance 10

1.3 Metodología general para la realización del estudio 10

2 GENERALIDADES DE LOS USOS DIRECTOS DE CALOR GEOTÉRMICO 13

2.1 Clasificación de los recursos geotérmicos 13

2.2 Aplicaciones de los usos directos (diversos) 15

2.3 Etapas típicas de un proyecto de usos directos de calor geotérmico 21

3 PANORAMA INTERNACIONAL DE LOS USOS DIRECTOS DE CALOR 24

3.1 Capacidad instalada mundial 24

3.2 Tendencias tecnológicas 32

3.3 Políticas de incentivos a nivel internacional 34

3.4 Aspectos relacionados con costos de inversión de los proyectos de UDCG. 38

4 ENTORNO NACIONAL 44

4.1 Potencial de aprovechamiento 45

4.2 Capacidad instalada 47

4.3 Proyectos piloto y proyectos de investigación 48

5 MARCO REGULATORIO PARA LOS USOS DIRECTOS DE CALOR GEOTÉRMICO. 51

ANEXOS 54

Anexo 1. Estado actual de actividad en investigación y desarrollo 54

Usos directos de calor (general) 54

Aplicaciones en cascada 58

Aplicación: calentamiento 62

Bombas de calor 66

Nacional 72

Análisis de patentes 76

Anexo 2. Capacidad instalada y consumo máximo de energía geotérmica a través de usos directos en México por localidad 79

REFERENCIAS 81

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso metodológico para realizar el Reporte de Inteligencia Tecnológica 10

Figura 2. Configuración de un sistema típico de uso directo de calor geotérmico 17

Figura 3. Ejemplo de sistema cascada que combina calor y electricidad 19

Figura 4. Flasheo de vapor (25 o 50 MW) de plantas geotérmicas convencionales 20

Figura 5. Esquema de bombas de calor geotérmicas para enfriamiento y calefacción 20

Figura 6. Actividades típicas en la implementación de un proyecto geotérmico. 21

Figura 7. Crecimiento de la capacidad instalada y aprovechamiento de energía geotérmica a través de Usos directos del calor (1995-2015) 25

Figura 8 Capacidad instalada de las diferentes aplicaciones de UDCG (1995-2015) 26

Figura 9 Uso anual de energía en aplicaciones de UDCG (1995-2015) 26

Figura 10 Distribución de la capacidad instalada de las diferentes aplicaciones de usos directos del calor geotérmico, 2015 27

Figura 11 Distribución del uso de las diferentes aplicaciones de UDCG durante 2015 27

Figura 12. Progreso anual sobre las publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor 55

Figura 13. Fuentes con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor 55

Figura 14. Autores con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor 56

Figura 15. Organizaciones con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor 56

Figura 16. Tipo de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor 57

Figura 17. Países con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor 58

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Figura 18. Progreso anual sobre las publicaciones relacionadas con el tema de aplicaciones en cascada 59

Figura 19. Fuentes con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de aplicaciones en cascada 59

Figura 20. Autores con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de aplicaciones en cascada 60

Figura 21. Organizaciones con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de aplicaciones en cascada 60

Figura 22. Tipo de publicaciones relacionadas con el tema de aplicaciones en cascada 61

Figura 23. Países con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de aplicaciones en cascada 62

Figura 24. Progreso anual sobre las publicaciones relacionadas con el tema de calentamiento 63

Figura 25. Fuentes con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de calentamiento 63

Figura 26. Autores con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de calentamiento 64

Figura 27. Organizaciones con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de calentamiento 65

Figura 28. Tipo de publicaciones relacionadas con el tema de calentamiento 65

Figura 29. Países con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de calentamiento 66

Figura 30. Progreso anual de publicaciones sobre el tema de bombas de calor geotérmico (groud source heat pumps) 67

Figura 31. Fuentes con mayor número de documentos publicados relacionados con el tema bombas de calor geotérmico (ground source heat pump) 68

Figura 32. Autores con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de bombas de calor geotérmico (ground source heat pump) 69

Figura 33. Organizaciones con mayor número de publicaciones del tema bombas de calor geotérmico (ground source heat pump) 70

Figura 34. Publicaciones relacionadas con el tema de bombas de calor clasificadas por tipo de documento 71

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Figura 35. Países con mayor número de publicaciones relacionadas con las bombas de calor geotérmico (ground souce heat pumps) 71

Figura 36. Progreso anual nacional sobre las publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor 72

Figura 37. Fuentes con mayor número a nivel nacional de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor 73

Figura 38. Autores nacionales con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor 73

Figura 39. Organizaciones con mayor porcentaje en número de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor 74

Figura 40. Tipo de publicaciones nacionales relacionadas con el tema de usos directos de calor 75

Figura 41. Progreso anual de las patentes publicadas sobre usos directos de calor geotérmico 76

Figura 42. Principales organizaciones con patentes 77

Figura 43. Países con mayor número de patentes publicadas sobre usos directos de calor geotérmico 77

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los recursos geotérmicos 14

Tabla 2 Resumen de varias aplicaciones de usos directos de calor geotérmico a nivel mundial durante el periodo 1995-2015. 28

Tabla 3. Aspectos a considerar en la estimación de costos de los proyectos de UDCG 39

Tabla 4. Centrales geotérmicas localizadas en México 45

Tabla 5. Recursos geotérmicos identificados en el territorio mexicano 46

Tabla 6. Principales estudios publicados enfocados en la identificación de recursos geotérmicos 46

Tabla 7. Capacidad instalada a nivel nacional de usos directos del calor geotérmico, 2013 48

Tabla 8 Proyectos piloto y demostrativos realizados por la CFE 49

Tabla 9. Proyectos del CEMIE-Geo relacionados con los usos directos del calor geotérmico 50

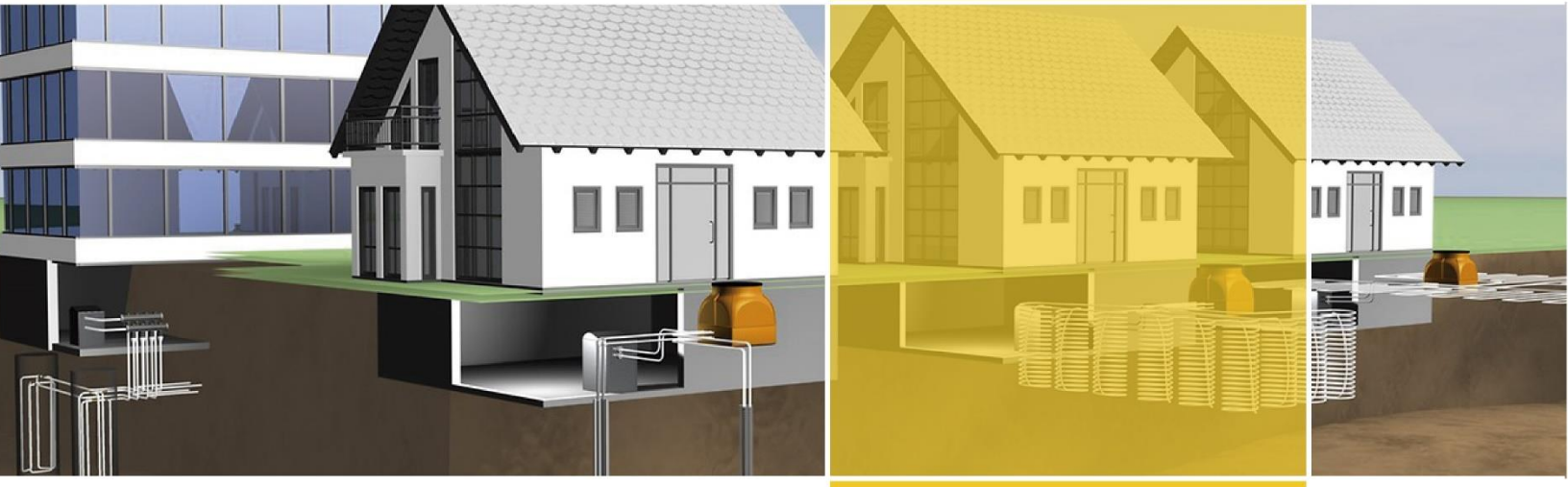
Tabla 10. Leyes y reglamentos relacionados con los usos directos del calor geotérmico 51

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AZEL	*Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias*
BCG	*Bomba de Calor Geotérmico*
CEMIE-Geo	*Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica*
CFE	*Comisión Federal de Electricidad*
CONACYT	*Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*
IEA	*International Energy Agency (Agencia Internacional de Energía)*
IGA	*International Geothermal Association (Asociación Geotérmica Internacional)*
INEL	*Inventario Nacional de Energías Limpias*
INEEL	*Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias*
LEG	*Ley de Energía Geotérmica*
SENER	*Secretaría de Energía*
UDCG	*Usos Directos del Calor Geotérmico*

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.



1. INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

La Secretaría de Energía (SENER) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) apoyaron la creación de los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIES) a través del Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética (CONACYT, 2014). La justificación de esta iniciativa se fundamenta en la Ley de Transición Energética y la Estrategia Nacional de Energía 2013-2027.

De esta manera se creó el CEMIE-Geo para establecer alianzas que coadyuven en el abatimiento de las barreras y retos científicos y tecnológicos que enfrenta el país para el aprovechamiento sustentable de la energía geotérmica. El Centro ha establecido cuatro temas de investigación principales, uno de ellos enfocado a los usos directos del calor geotérmico[1].

Otra iniciativa patrocinada por el Fondo de Sustentabilidad Energética (FSE) está relacionada con la generación de mapas de ruta tecnológica para las diferentes energías renovables. Al respecto, en 2017 se publicó el Mapa de Ruta en Geotermia (SENER, 2017), cuyo enfoque principal fue la identificación de los retos técnicos que enfrenta la industria para incrementar el aprovechamiento de la geotermia en la generación de electricidad, por lo que se recomendó realizar un ejercicio específico para Usos Directos del Calor Geotérmico en virtud de esta vertiente de aprovechamiento de energía tiene problemáticas y perspectivas diferentes.

De esta forma, el presente reporte forma parte de los entregables asociados al proyecto para la realización del Mapa de Ruta Tecnológica de Usos Directos del Calor Geotérmico que el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) llevó a cabo para el FSE. Este documento incluye un panorama del entorno, tecnologías, retos, oportunidades y tendencias relacionadas con la utilización de los usos directos de calor geotérmico.

[1] Las otras áreas de investigación son: evaluación de los recursos geotérmicos nacionales, desarrollo e innovación de técnicas de exploración y desarrollos tecnológicos para explotación.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

1.1 Objetivo

El objetivo de este documento es identificar las tecnologías y tendencias asociadas a la aplicación de los usos directos de calor geotérmico y servirá como insumo de información para diseñar y definir los alcances del mapa de ruta tecnológica de usos directos de calor geotérmico.

1.2 Alcance

El presente documento presenta el estado que guarda la tecnología disponible para el aprovechamiento de la energía geotérmica a través de los usos directos de calor, las diferentes aplicaciones empleadas, las etapas típicas de un proyecto de usos directos, los costos asociados así como el contexto de la industria en México. Cabe señalar que el contenido que se presenta no comprende un inventario de las capacidades nacionales relacionadas con los usos directos de calor geotérmico, sino una base para establecer el enfoque y alcance del mapa de ruta tecnológica.

1.3 Metodología general para la realización del estudio

La elaboración de este documento se llevó acabo en diferentes etapas. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** resume las actividades realizadas para la elaboración del reporte de inteligencia tecnológica.

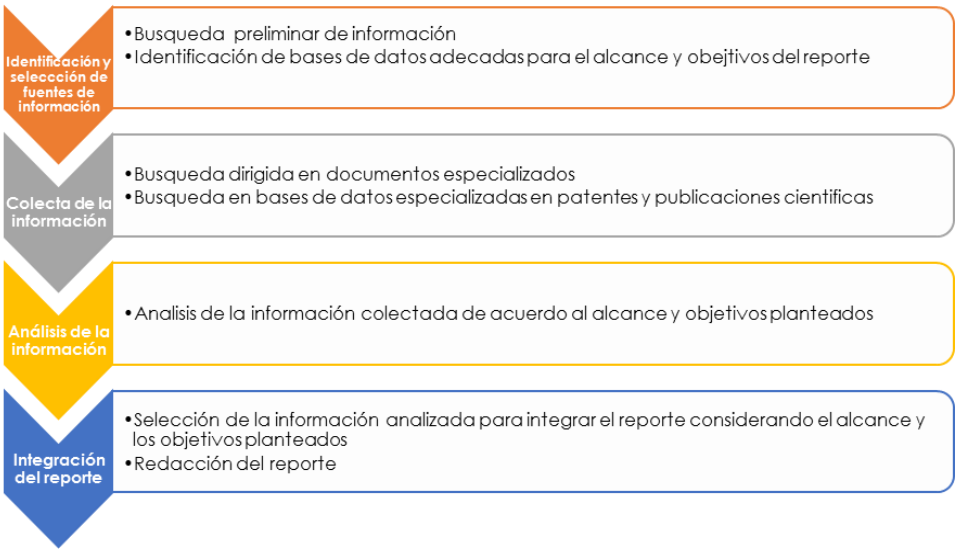


Figura 1. Proceso metodológico para realizar el Reporte de Inteligencia Tecnológica

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

1. **Identificación de la fuente de datos.** Las fuentes de información primarias consultadas forman parte de las bases de datos con las que cuenta el Instituto Mexicano del Petróleo como *son Scopus y Derwent Innovation*. La búsqueda se realizó a través de palabras clave a lo largo de las publicaciones realizadas en el periodo 2000-2018. Adicionalmente se consultaron artículos y reportes de carácter técnico y publicaciones de asociaciones especializadas en geotermia.

2. **Colecta de información.** A partir de las fuentes consultadas se recuperaron datos e información que fue organizada de manera temática para facilitar su posterior procesamiento y análisis, así como su integración en el reporte.

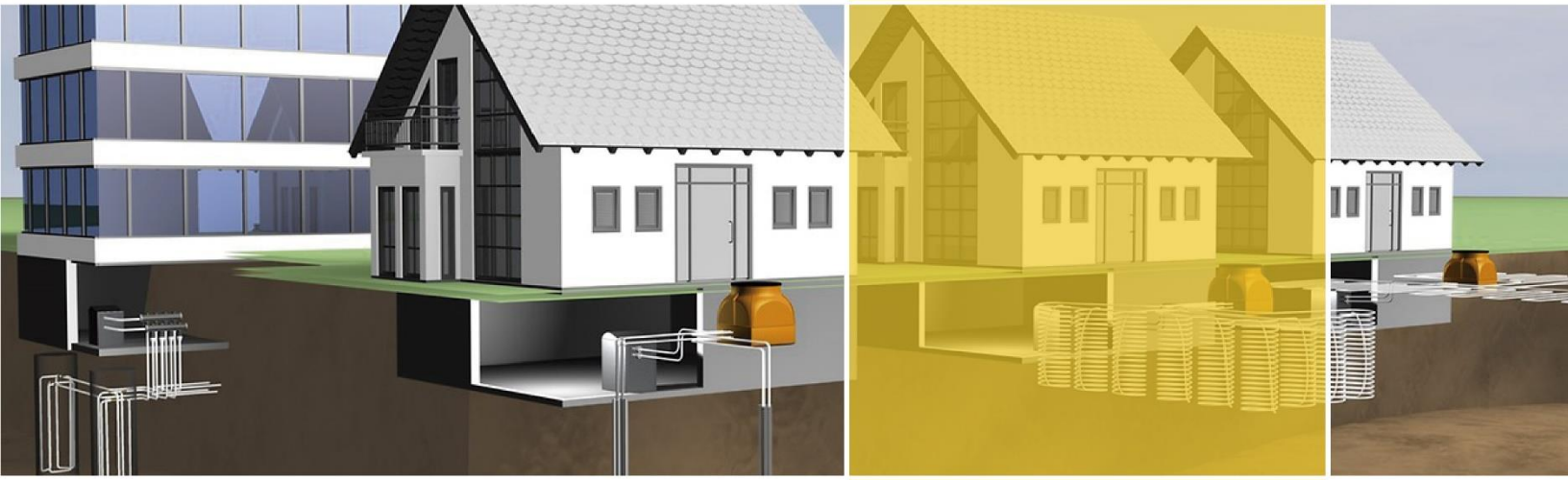
3. **Análisis de la información.** El análisis de la información se dividió en 2 grandes aspectos: identificación de la situación actual de los usos del calor geotérmico y avances en el desarrollo de alternativas tecnológicas para las tecnologías asociadas. En el segundo caso, se utilizaron técnicas bibliométricas para explorar la evolución de la intensidad de las actividades de investigación desarrollo.

4. **Elaboración del reporte.** A partir de la información, datos y análisis de los mismos, se procedió a elaborar el reporte cuyo detalle se encuentra descrito en el presente documento.

Una vez obtenida la información, procedió a un análisis y selección de la información, considerando los objetivos y alcances del documento, así como su aportación al mapa de ruta de usos directos del calor geotérmico.

Finalmente, se elaboró se integró el reporte con la información seleccionada.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.



2. GENERALIDADES DE LOS USOS DIRECTOS DEL CALOR GEOTÉRMICO

2 GENERALIDADES DE LOS USOS DIRECTOS DE CALOR GEOTÉRMICO

La energía geotérmica se define como la energía contenida en forma de calor en el interior de la Tierra. El origen de este calor es el resultado del colapso gravitatorio que formó a la tierra y de la desintegración radiactiva de diferentes elementos entre los que se encuentran isotopos de uranio, torio y potasio, los cuales están presentes en la corteza.

El aprovechamiento directo de los recursos geotérmicos es una de las formas más antiguas y versátiles de utilizar la energía (Dickson & Fanelli, 2003). Los usos directos del calor geotérmico pueden definirse como el uso térmico de la energía sin ser transformada, por ejemplo, en electricidad (Jóhannesson & Chatenay, 2014a).

Considerando su alto potencial de aprovechamiento[2] y su contribución a la mitigación de los problemas de cambio climático, efecto invernadero y el calentamiento global de la tierra, resulta relevante impulsar su aprovechamiento (Fridleifsson, et al., Fridleifsson, G. et al., 2008).

En esta sección se presenta un resumen de la clasificación de los recursos geotérmicos, las aplicaciones más utilizadas y las etapas típicas de un proyecto de usos directos.

2.1 Clasificación de los recursos geotérmicos

Los recursos geotérmicos pueden clasificarse considerando diferentes criterios. Por su temperatura se clasifican en sistemas de baja media y alta entalpía (Lee, 1996; Williams & Anderson, 2011; Dickson & Fanelli, 2003). En este sentido se han identificado las aplicaciones más propicias para cada tipo de sistema y actualmente se considera que los de media y alta entalpía son adecuados para la generación de electricidad, mientras que los de baja entalpía son adecuados para el aprovechamiento directo de energía térmica.

Otro criterio de clasificación de los recursos geotérmicos es por su ubicación, pudiendo ser de dos tipos: continentales o submarinos. Por otra parte, considerando la presencia de fluidos los sistemas pueden ser hidrotermales o de roca seca caliente (Santoyo *et al*., 2015).

[2] Se estima que el calor total de la tierra es del orden del os 12.6 billones de exajoules (12 x 10^{12} EJ), y el que se encuentra hasta una profundidad media de 50 km, en la capa conocida como litósfera, se podría estimar en 5 mil 400 millones de exajoules (5.4 x 10^{9} EJ). Este calor se disipa anualmente en la superficie terrestre a un ritmo de 1,388 exajoules (Dickson & Fanelli, 2003).

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Los recursos geotérmicos de tipo hidrotermal están constituidos por una fuente de calor que puede ser fluido (líquido o vapor) y roca, en donde se almacena el fluido geotérmico, (yacimiento o reservorio). La fuente de calor calienta el fluido acumulado alcanzando temperaturas de hasta 500°C (Santoyo & Torres , 2010). Este tipo de sistemas son los que se explotan comercialmente en la actualidad. Y pueden clasificarse a su vez en vapor dominante o liquido dominante.

Por otro lado, los recursos geotérmicos también pueden clasificarse por tipo de yacimiento, dentro de esta clasificación se encuentran los denominados de roca seca caliente, que se caracterizan por la disponibilidad de una fuente de calor (roca caliente) y la ausencia de fluidos debido a las características geológicas propias de estos sistemas, generalmente rocas cristalinas y no permeables. En la actualidad, este tipo de yacimientos son poco explotados (Tester *et al.,* 2007). En la *Tabla 1* se presenta un resumen de las clasificaciones mencionadas.

Tabla 1. Clasificación de los recursos geotérmicos

	Por entalpía (°C)				Por ubicación	Por presencia de fluidos
	(a)	(b)	(c)	(d)	• Continentales • Submarinos	• Hidrotermales • Roca seca caliente
Alta	>150	>225	>220	>150		
Media	90-15	125-225	100-200	---		
Baja	<90	<125	<100	≤150		

(a) Muffler & Cataldi, 1978; (b) Hochstein, 1990; (c) Benderitter & Cormy, 1990; (d) Haenel *et al.,* 1988.
FUENTE: Elaboración propia a partir de (Lee, 1996; Santoyo et al., 2014)

De acuerdo con Santoyo & Torres (2010) se han identificado nueve tipos de yacimientos en total, por lo que además de los mencionados, están los siguientes: supercríticos, sistemas radiogénicos, magmático, geopresurizados, asociados a cuencas sedimentarias y finalmente, sistemas de agua caliente asociados a yacimientos de petróleo y gas.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

2.2 Aplicaciones de los usos directos (diversos)

Como se mencionó, es posible aprovechar el calor geotérmico directamente a través de diferentes aplicaciones y durante las últimas décadas se ha incrementado su aprovechamiento y en consecuencia, la capacidad instalada en el mundo. Muchos procesos y equipos, que requieren calor pueden usar este tipo de energía, entre los usos más comunes se encuentran acondicionamiento de edificios (calentamiento y enfriamiento), acondicionamiento de invernaderos, secado de cultivos, piscicultura, deshielo, uso sanitario, actividades con fines terapéuticos y procesos industriales.

En el ámbito nacional, el artículo 2 del Reglamento de la Ley de Energía Geotérmica (DOF, 2014), define como usos directos o diversos a aquellos usos en los que se puede aprovechar la energía geotérmica diferente a la generación de energía eléctrica, entre los que se encuentran, la calefacción urbana o de invernaderos, elaboración de conservas, secado de productos agrícolas o industriales, deshielo, lavado de lana y tintes, refrigeración por absorción con amoníaco, extracción de sustancias químicas, destilación de agua dulce, recuperación de metales, evaporación de soluciones concentradas y fabricación de pulpa de papel.

A continuación se presenta una breve descripción de las aplicaciones de usos directos del calor geotérmico más utilizadas.

Agricultura y agroindustria

En la agricultura y la agroindustria se pueden identificar cuatro aplicaciones principales (Popovski, 2009):

- Acondicionamiento de invernaderos
- Acondicionamiento de estanques para piscicultura y producción de algas
- Procesos agroindustriales

Estas aplicaciones utilizan fuentes geotérmicas de baja y media entalpia (temperatura), así como el calor residual y el agua remanente proveniente de las plantas geotérmicas electricidad (sistemas en cascada) (Nguyen, *et al.*, 2015).

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Usos Industriales

Los procesos industriales convencionales que utilizan calor a partir de combustibles fósiles, en muchos casos, pueden adaptarse para emplear calor geotérmico, manteniendo la eficiencia técnica y con factibilidad económica (Jóhannesson & Chatenay, 2014b).

Los procesos típicos relacionados con los usos industriales del calor geotérmico son los siguientes ((Lindal, 1992)

- **Secado:** el proceso de secado puede realizarse utilizando aire precalentado con un fluido geotérmico a través de un intercambiador de calor o por contacto directo. Este proceso es comúnmente utilizado para el secado de cultivos y pescado.
- **Evaporación:** El proceso de evaporación es utilizado para la concentración de soluciones por ejemplo para obtener sal. El proceso también es utilizado para la desalación de agua en cualquier proceso que requiera la vaporización de un soluto.
- **Destilación:** la destilación es un proceso de separación de mezclas, basado en la diferencia de volatilidad de los componentes en una mezcla liquida hirviente. La destilación es un proceso comúnmente utilizado en la industria de los licores e hidrocarburos.
- **Refrigeración:** Las bombas de calor por absorción utilizan litio o bromuro y son ampliamente conocidas por ser un equipo adecuado para enfriamiento industrial o congelamiento con calor geotérmico.
- **Procesos de calentamiento:** El proceso de calentamiento puede llevarse a cabo a través del precalentado de agua en una caldera con calentamiento directo.
- **Acondicionamiento de espacios industriales:** Puede ser un elemento específico durante un proceso industrial que requiera mantener una temperatura específica.
- Otros procesos como extracción, lavado y secado, horneado, etc.

Los beneficios de la utilización de calor geotérmico, depende de las características del recurso geotérmico y la aplicación industrial, pueden superar los costos de las adaptaciones requeridas para la utilización de esta fuente (Jóhannesson & Chatenay, 2014b).

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Climatización de espacios

La calefacción de espacios individuales, residenciales y distritales a través del bombeo de fluido de pozos o con intercambiadores subterráneos, es la forma más simple de calefacción por medio de usos directos. En el primer caso, el fluido geotérmico es bombeado del pozo hacia la estructura donde un intercambiador de calor transfiere la energía de la fuente geotérmica hacia el sistema de calefacción del edificio. El fluido geotérmico se regresa al acuífero por inyección del pozo o es dispuesto en la superficie (Bloomquist, 2003).

Cuando el fluido geotérmico con temperaturas elevadas se encuentra a poca profundidad (20-200 metros) se puede emplear un intercambiador de calor subterráneo, ver Figura 2, esto elimina la necesidad de bombeo del fluido geotérmico del yacimiento hacia el sistema de disposición.

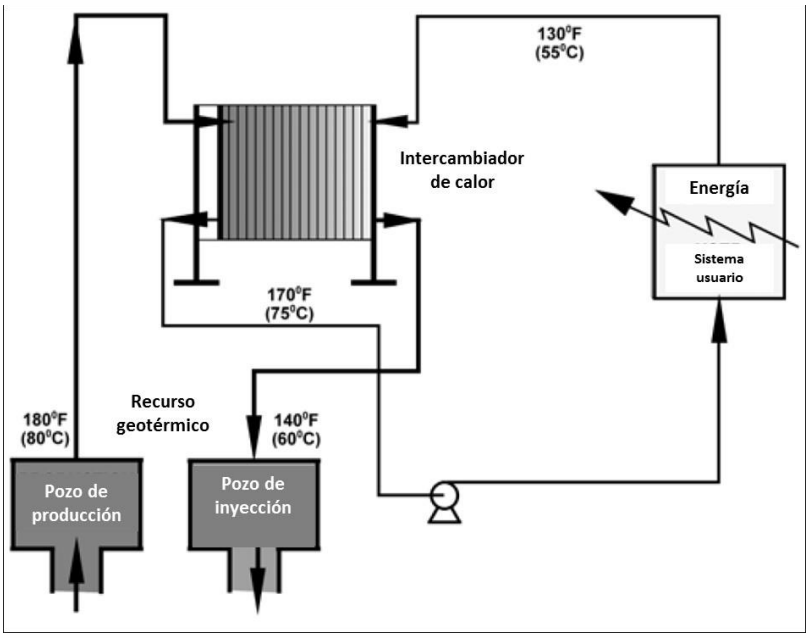


Figura 2. Configuración de un sistema típico de uso directo de calor geotérmico

Fuente: (Lund et al., 2010).

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Spas, balneología, albercas

El fluido geotérmico o agua geotérmica se ha utilizado desde tiempos antiguos como tratamiento para diferentes afecciones en la salud humana. Existen registros de su utilización en diferentes culturas entre las que se encuentran los egipcios, los judíos, griegos, turcos y romanos (Lund J. , 1996). Estas prácticas se han modernizado y actualmente, existen centros de salud, que bajo supervisión médica, utilizan el agua geotérmica y los minerales como parte de tratamientos para la cura de diversas enfermedades así como en terapias preventivas. Estos centros, se han establecido en diversos países alrededor del mundo; sin embargo han cobrado un mayor auge en Europa y Japón.

El diseño de los spas y balnearios es muy variable, esto depende de la cultura local, las características únicas del lugar así como objetivos del desarrollador en términos del clima, tipo de servicios y usuarios. No obstante, cualquier diseño debe considerar las siguientes variables: control de humedad, requerimientos de ventilación para contar con aire de calidad, diseño de ductos, composición del agua de las albercas y rangos de evaporación.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Usos en cascada o usos combinados

El uso en cascada del calor geotérmico, se caracteriza por contar con varias aplicaciones organizadas en forma secuencial para usar el mismo recurso en temperaturas variables.

Las aplicaciones de los usos directos, de manera individual, no siempre prometen retornos de la inversión atractivos, principalmente por los altos costos de capital inicial. La implementación de diferentes aplicaciones en configuraciones de sistemas en cascada resulta benéfico debido a que además de que se aprovecha el fluido remanente aún caliente para otra aplicación en serie, los costos de inversión también pueden ser distribuidos entre las diferentes aplicaciones haciendo los proyectos más rentables (CanGEA, 2014).

Generalmente, el fluido geotérmico residual proveniente de plantas geotermoeléctricas es aprovechado en aplicaciones de usos directos por medio de configuraciones de sistemas en cascada, teniendo la ventaja de disminuir los costos iniciales de exploración. Figura 5 se presenta un ejemplo de este tipo de sistemas.

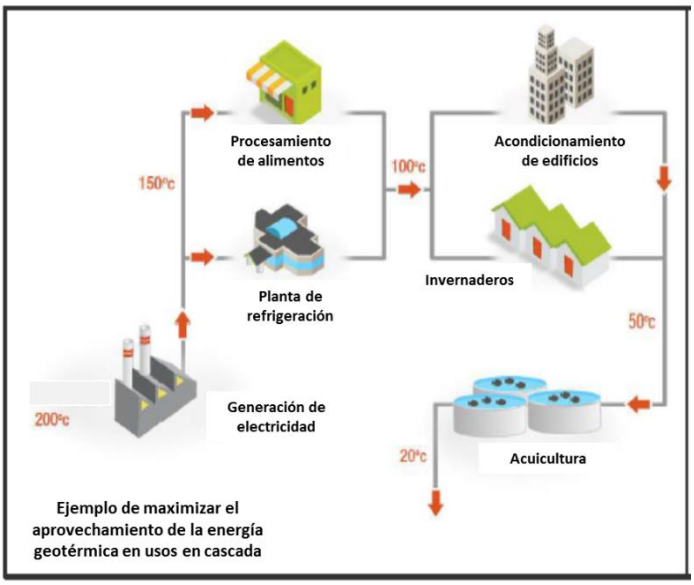


Figura 3. Ejemplo de sistema cascada que combina calor y electricidad

Fuente: Adaptado de (CanGEA, 2014).

Cuando el fluido geotérmico proviene de las plantas geotermoeléctricas, este se encuentra en dos fases (líquido y vapor) y alta temperatura (más de 200° C). El vapor una vez separado se conduce hacia turbinas de generación (figura 4), mientras que el agua, dependiendo de su temperatura, es reutilizada en diversas aplicaciones antes de regresarla al subsuelo para recargar el sistema y evitar problemas de contaminación del medio ambiente.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

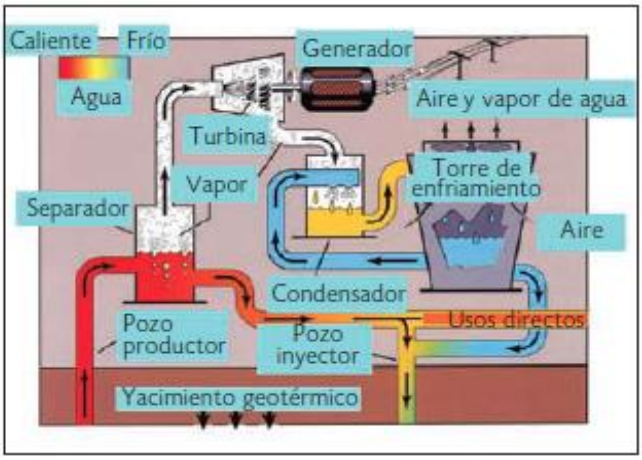


Figura 4. Flasheo de vapor (25 o 50 MW) de plantas geotérmicas convencionales

Fuente: (Santoyo & Barragán, 2010)

Bombas de calor geotérmico

Las bombas de calor geotérmico (BCG) mejor conocidas internacionalmente como *Geothermal Heat Pumps (GHP) o Ground Source Heat Pumps (GSHP),* son máquinas térmicas que utilizan el gradiente de temperatura entre el subsuelo o el agua subterránea y el ambiente para acondicionar espacios (calefacción, enfriamiento, aire acondicionado). Una BCG es capaz de transportar el calor en dos direcciones, de manera que en invierno se usa el modo de calentamiento, es decir, el calor se extrae del suelo y se libera en el espacio a acondicionar, mientras que en verano el calor se extrae del espacio a acondicionar y se libera en el suelo, siendo este modo de operación de tipo aire acondicionado.

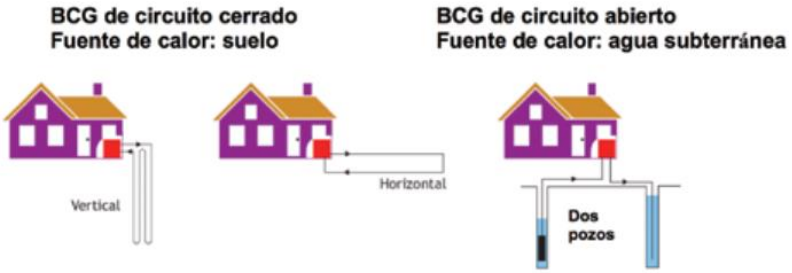


Figura 5. Esquema de bombas de calor geotérmicas para enfriamiento y calefacción

Fuente: (Barragan et al., 2011).

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

2.3 Etapas típicas de un proyecto de usos directos de calor geotérmico

El proceso de implementación de un proyecto de usos directos de calor puede dividirse en cuatro grandes fases: a) Identificación, b) exploración c) diseño y construcción y d) operación y mantenimiento. Cada una de estas etapas considera diferentes actividades (Chatenay & Jóhannesson, 2014), en cada una se observan actividades clave para el proyecto. En la figura 6 se muestran las etapas y las actividades que típicamente se llevan a cabo para la realización de un proyecto para el aprovechamiento de calor geotérmico a través de usos directos.

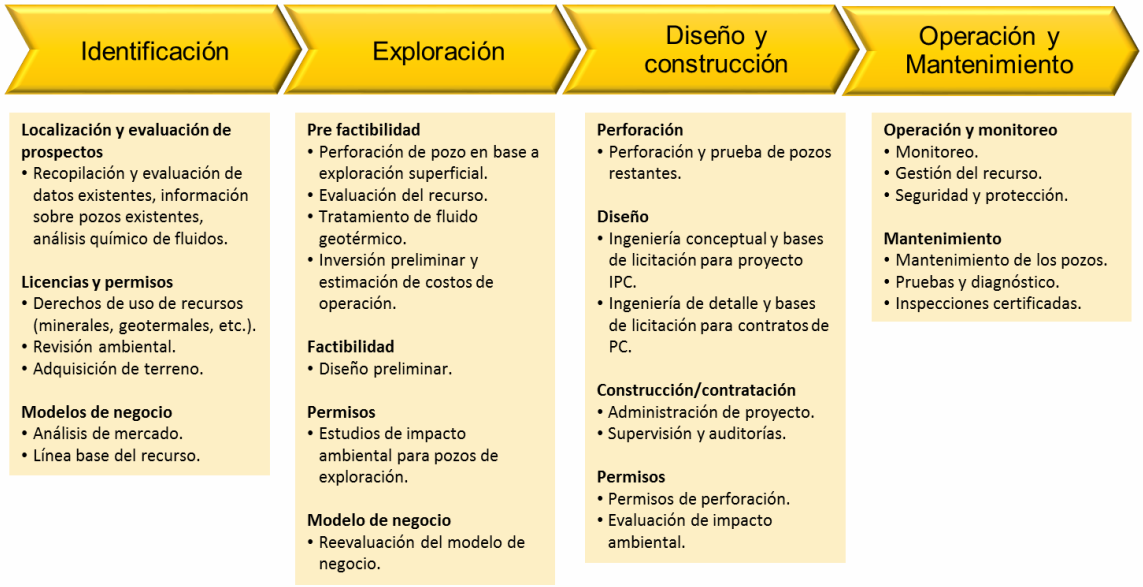


Figura 6. Actividades típicas en la implementación de un proyecto geotérmico.

Fuente: Chatenay and Jóhannesson, 2014.

Identificación

La primera fase de desarrollo se refiere a la identificación del recurso geotérmico y su exploración.

La fase de identificación de recursos incluye la recopilación y revisión de información geotérmica y otra información disponible, incluidos datos sobre geología, geofísica y geoquímica del presunto recurso. Una vez que el recurso ha sido identificado correctamente, el desarrollador del proyecto decide si continuar con el proyecto o no (Chatenay & Jóhannesson, 2014).

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Exploración

Durante la fase de exploración, generalmente se lleva a cabo un estudio de prefactibilidad. El informe de prefactibilidad se basa en la exploración de superficie. Si el resultado del informe de pre-factibilidad es que el proyecto es viable, la siguiente fase será la perforación de pozos de exploración que posteriormente se convertirán en pozos de producción, si la perforación es exitosa. Cuando la exploración ha demostrado que la capacidad del campo geotérmico es suficiente para un instalar una planta pequeña y económica de energía eléctrica u otra aplicación, se realiza un informe de factibilidad. Sobre esta base, se toma la decisión de la continuación del proyecto.

Esta etapa también puede incluir una revisión preliminar del impacto ambiental y diversas actividades relacionadas con el arrendamiento y los permisos.

Diseño y construcción

El diseño preliminar y conceptual de un proyecto podría comenzar durante la fase de evaluación del yacimiento; sin embargo, esto depende de los temas asociados al riesgo del proyecto y el financiamiento, por lo que en algunos casos, el diseño debe esperar hasta concluir la caracterización del yacimiento (Lund J. , 2009).

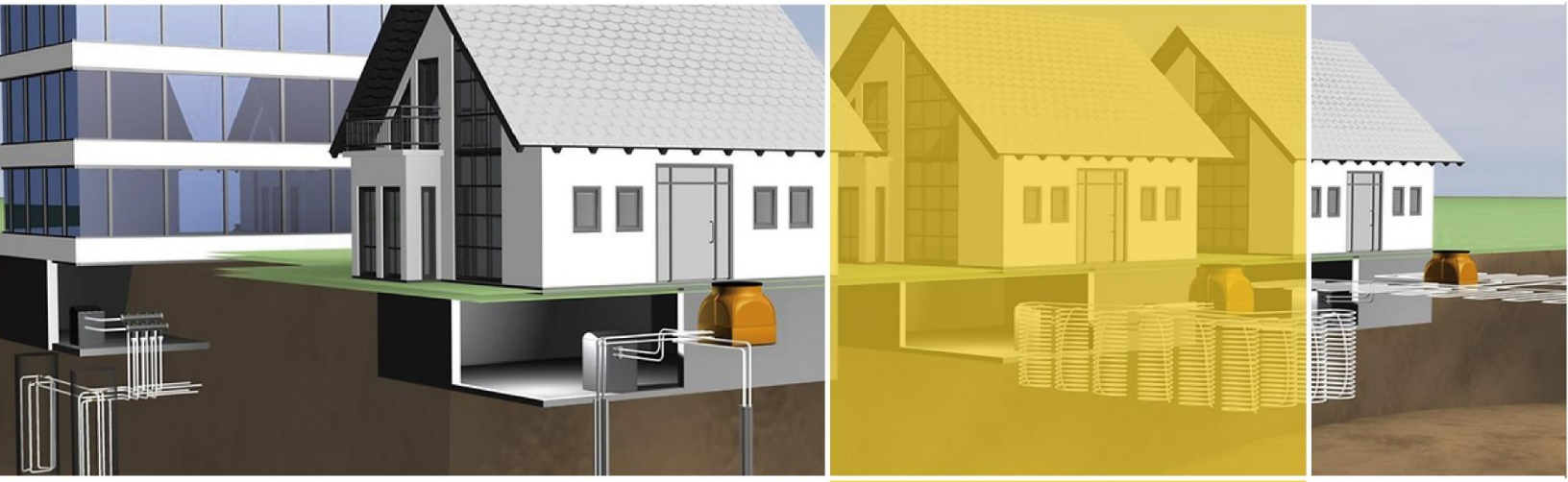
Durante el diseño y selección del equipo especialmente bombas, ductos, intercambiadores de calor y equipo de calefacción de espacios se deben tomar precauciones adicionales al considerar dentro del costo de estos equipos, aspectos relacionados a la corrosión y descamación, con el objetivo de hacer que el proyecto sea viable (Lund J. , 2009)

Operación y mantenimiento

Durante la etapa de operación y mantenimiento se deben realizar diversas tareas que en conjunto, garanticen el adecuado desempeño de las instalaciones. Las principales actividades a realizar en esta etapa son:

- Monitoreo del sistema geotérmico.
- Administración del recurso geotérmico.
- Cambios y/o acondicionamiento de equipo e instalaciones.
- Protección y seguridad.
- Mantenimiento de instalaciones.
- Pruebas, diagnósticos y mediciones.
- Inspección de instalaciones y equipos.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.



3. PANORAMA INTERNACIONAL DE LOS USOS DIRECTOS DEL CALOR GEOTÉRMICO

3 PANORAMA INTERNACIONAL DE LOS USOS DIRECTOS DE CALOR

En esta sección se presenta un resumen de la recopilación de información sobre el panorama de la capacidad instalada y el nivel de utilización de las diferentes aplicaciones de los usos directos del calor geotérmico a nivel mundial. También se presenta una revisión sobre las tendencias en temas de investigación y desarrollo tecnológico sobre el tema, y algunos aspectos relacionados con incentivos y cuestiones regulatorias para impulsar las aplicaciones de UDCG en diferentes países.

3.1 Capacidad instalada mundial

La Asociación Geotérmica Internacional (IGA) realiza un inventario cada cinco años para estimar el nivel de la capacidad instalada y consumo mundial de las diferentes aplicaciones de usos directos del calor geotérmico (Lund & Boyd, 2015). De acuerdo con tal inventario, hacia 2015 la capacidad total instalada a nivel mundial de UDCG era de 70,329 MWt, lo que representó un incremento de 45% con respecto a 2010, lo que a su vez indica a un crecimiento anual medio de 7.7%.

En términos de energía térmica generada, se estima que en ese mismo año de 2015 se generaron 587,786 TJ (equivalentes a 163,287 GWh térmicos), lo cual indica un crecimiento de 38.7% con respecto a 2010, o un incremento anual de 6.8%. Sin embargo, el factor de capacidad mundial promedio reveló una tendencia a la baja desde el año 2000, cuando este era de 0.4, reduciéndose a 0.31 en 2005, 0.28 en 2010 y de 0.26 en 2015. Es decir, en 2015 los más de 70 mil megawatts térmicos instalados en el mundo sólo operaron 2321 horas, en promedio, de las 8760 horas del año.

La disminución del factor de capacidad y del índice de crecimiento anual del consumo de usos directos de calor, se debe al aumento del número de instalaciones de bombas de calor geotérmico, que tienen un factor de capacidad menor a 0.21 a nivel mundial. La evolución en el crecimiento de la capacidad instalada y el consumo de la energía a través de usos directos durante el periodo de 1995 a 2015 se muestra en la Figura 7.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

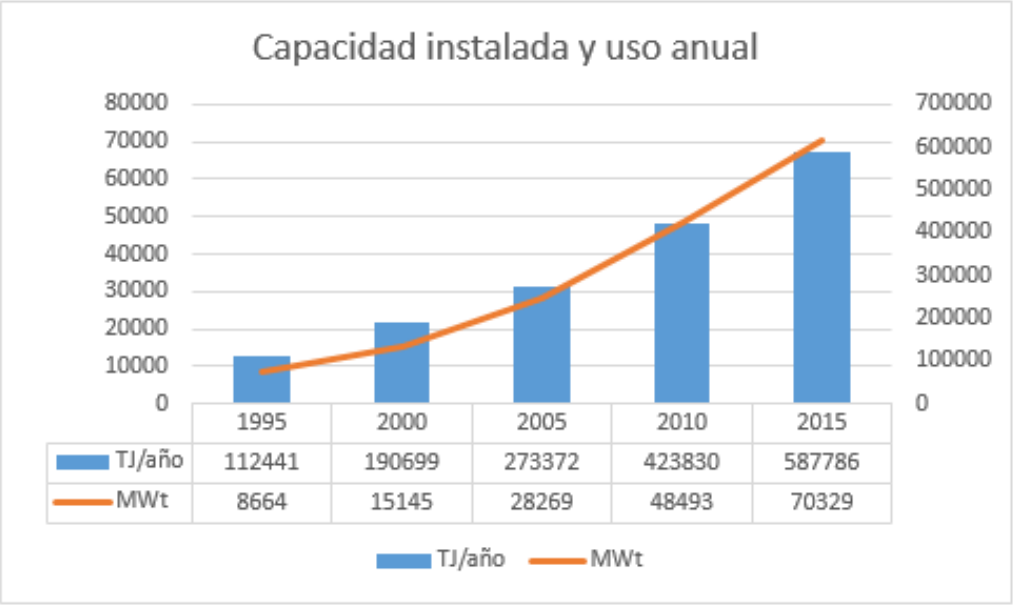


Figura 7. Crecimiento de la capacidad instalada y aprovechamiento de energía geotérmica a través de Usos directos del calor (1995-2015)

Fuente: (Lund & Boyd, 2015).

Las figuras 8 y 9 ilustran el incremento de capacidad instalada en MWt y del uso de energía en TJ/año para cada una de las diferentes aplicaciones de UDCG. Nótese en ambas el extraordinario crecimiento de las bombas de calor geotérmico, sobre todo a partir de 2000, mientras los demás usos directos han tenido un incremento mucho más modesto (balneología y acondicionamiento de espacios) o se han mantenido prácticamente estables.

Por su parte, la Figura 10 presenta la distribución de la capacidad instalada de cada una de las aplicaciones de los UDCG en 2015, y la Figura 11 indica la generación efectiva de calor de cada aplicación de UDCG para ese mismo año, expresada en porcentaje del total.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

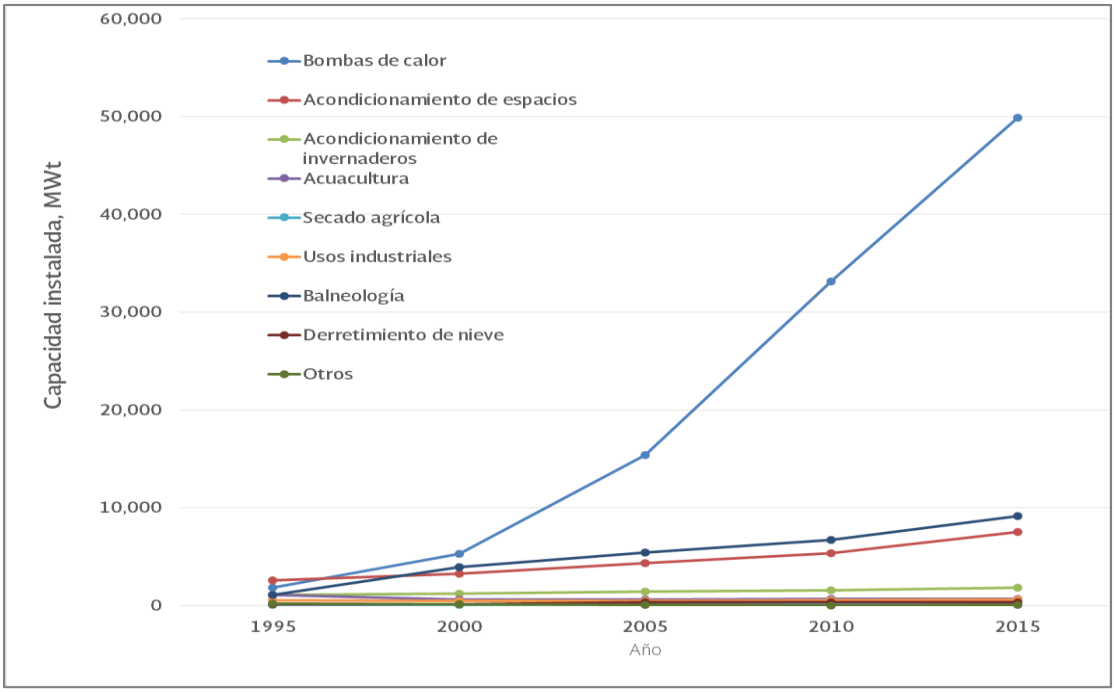


Figura 8 Capacidad instalada de las diferentes aplicaciones de UDCG (1995-2015)

FUENTE: Basado en (Lund & Boyd, 2015)

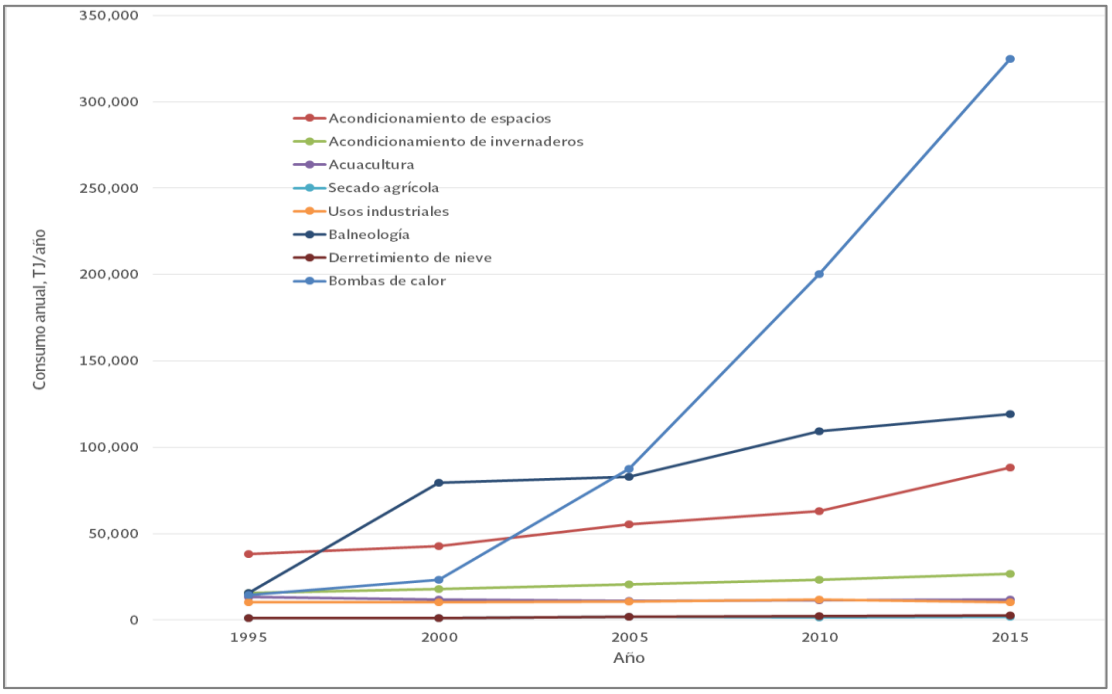


Figura 9 Uso anual de energía en aplicaciones de UDCG (1995-2015)

FUENTE: Basado en (Lund & Boyd, 2015)

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

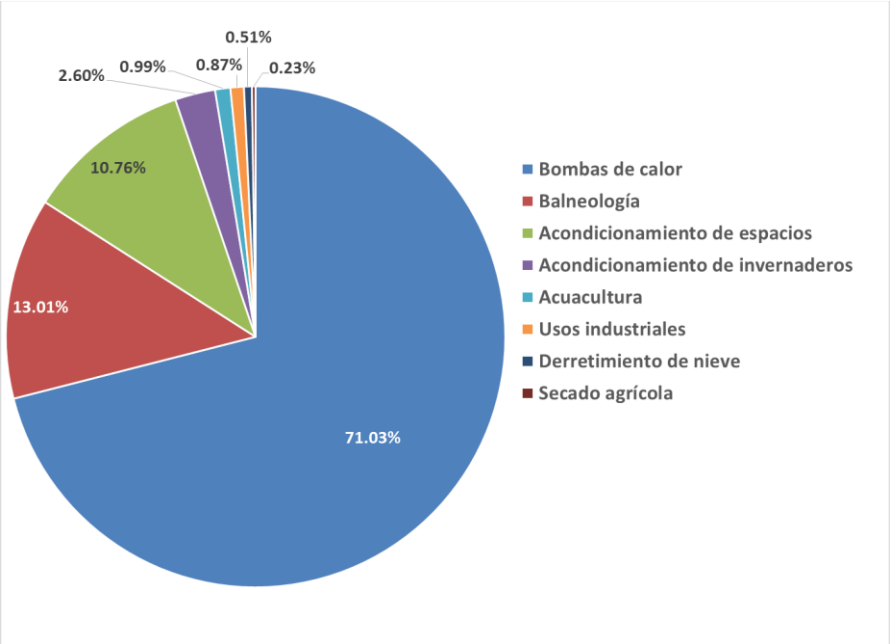


Figura 10 Distribución de la capacidad instalada de las diferentes aplicaciones de usos directos del calor geotérmico, 2015

FUENTE: Basado en (Lund & Boyd, 2015)

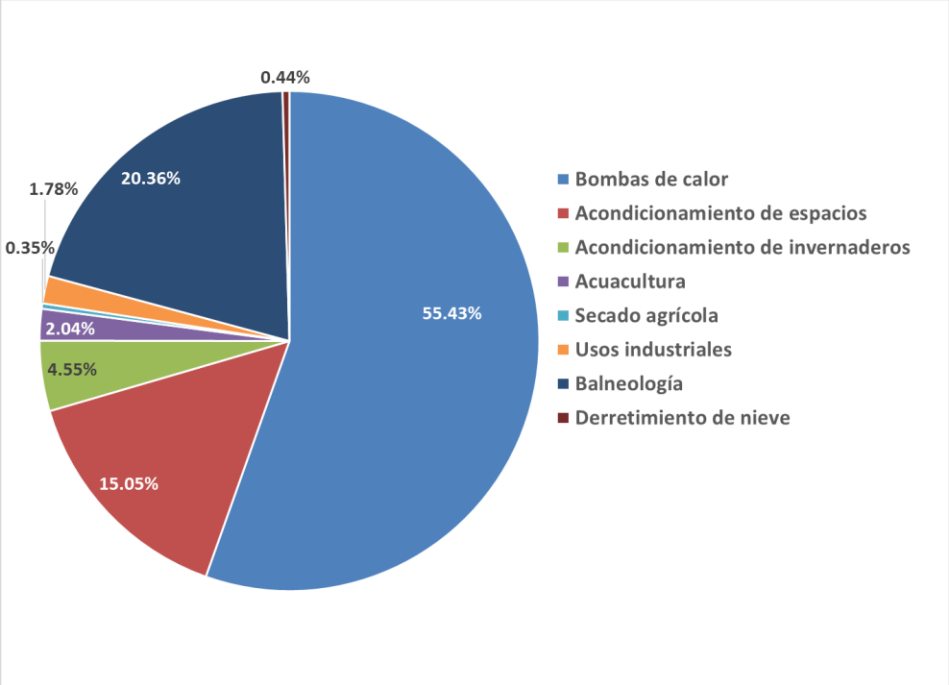


Figura 11 Distribución del uso de las diferentes aplicaciones de UDCG durante 2015

FUENTE: Basado en (Lund & Boyd, 2015)

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Por otra parte, en la tabla 2 se presentan los datos de 1995, 2000, 2005, 2010 y 2015 en los diversos usos en términos de capacidad, uso de energía y factor de capacidad.

Tabla 2 Resumen de varias aplicaciones de usos directos de calor geotérmico a nivel mundial durante el periodo 1995-2015.

a) Capacidad instalada, MWt

Aplicación	2015	2010	2005	2000	1995
Bombas de calor	49,898	33,134	15,384	5,275	1,854
Calefacción de espacios	7,556	5,394	4,366	3,263	2,579
Calefacción de invernaderos	1,830	1,544	1,404	1,246	1,085
Calentamiento de estanques en acuicultura	695	653	616	605	1,097
Secado agrícola	161	125	157	74	67
Usos industriales	610	533	484	474	544
Baños y albercas	9,140	6,700	5,401	3,957	1,085
Enfriamiento/ Derretimiento de nieve	360	368	371	114	115
Otros	79	42	86	137	238
Total	**70,329**	**48,493**	**28,269**	**15,145**	**8,664**

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

b) Utilización, TJ/año

Aplicación	2015	2010	2005	2000	1995
Bombas de calor	325,028	200,149	87,503	23,275	14,617
Calefacción de espacios	88,222	63,025	55,256	42,926	38,230
Calefacción de invernaderos	26,662	23,264	20,661	17,864	15,742
Calentamiento de estanques en acuicultura	11,958	11,521	10,976	11,733	13,493
Secado agrícola	2,030	1,635	2,013	1,083	1,124
Usos industriales	10,453	11,745	10,868	10,220	10,120
Baños y albercas	119,381	109,410	83,018	79,546	15,742
Enfriamiento/ Derretimiento de nieve	2,600	2,126	2,032	1,063	1,124
Otros	1,452	955	1,045	3,034	2,249
Total	**587,786**	**423,830**	**273,372**	**190,699**	**112,441**

c) Factor de capacidad

Aplicación	2015	2010	2005	2000	1995
Bombas de calor	0.207	0.19	0.18	0.14	0.25
Calefacción de espacios	0.370	0.37	0.40	0.42	0.47
Calefacción de invernaderos	0.462	0.48	0.47	0.45	0.46
Calentamiento de estanques en acuicultura	0.546	0.56	0.57	0.61	0.39
Secado agrícola	0.400	0.41	0.41	0.44	0.53
Usos industriales	0.543	0.70	0.71	0.68	0.59
Baños y albercas	0.414	0.52	0.49	0.64	0.46
Enfriamiento/ Derretimiento de nieve	0.229	0.18	0.17	0.30	0.31
Otros	0.583	0.72	0.39	0.70	0.30
Total	**0.265**	**0.28**	**0.31**	**0.40**	**0.41**

Fuente: (Lund & Boyd, 2015)

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Bombas de calor

Las bombas de calor son la aplicación más utilizada de la energía geotérmica a nivel mundial, con una capacidad instalada del 70.95% y el 55.3% del uso anual de esta energía. La capacidad instalada es de 49,898 MWt y el uso de energía anual es de 325,028 TJ/año, con un factor de capacidad de 0.21 (en modo de calentamiento).Aunque la mayoría de las instalaciones se encuentran en EE UU AA, Europa y China, el número de países con instalaciones se incrementó de 26 en el año 2000 a 33 en 2005, 43 en 2010 y a 48 en 2015. El número equivalente de unidades instaladas de 12 kW (típicamente en residencias de EEUUAA y Europa Occidental) es de aproximadamente 4.16 millones. Esto indica un incremento del 51% del número de unidades instaladas en 2010 y casi tres veces más que las unidades reportadas en 2005. El tamaño de las unidades individuales está en el rango de los 5.5. kW, mientras que unidades más grandes de 150 kW se instalan en comercios e instituciones.

Los líderes en instalaciones de bombas de calor son EE UU AA, China, Suecia, Alemania y Francia.

Calefacción de espacios

El uso de energía geotérmica para calefacción de espacios se incrementó en 44% de 2010 a 2015. Los líderes en el uso de este tipo de energía para calefacción urbana en términos de uso anual son China, Islandia, Turquía, Francia y Alemania, mientras que Turquía, EE UU AA, Italia, Eslovaquia y Rusia son los principales usuarios de esta energía para calentamiento de espacios (de un total de 28 países).

Invernaderos y calefacción de terrenos cubiertos

En este rubro la capacidad instalada se ha incrementado en el periodo en un rango de 19% en la capacidad instalada y 16% en el consumo anual de energía entre 201 y 2015. La capacidad total instalada es de 1,830 MWt y el consumo de 26,662 TJ/año. Los países líderes en este rubro son Turquía, Rusia, Hungría, China y Holanda. La mayoría de los países no hace distinción entre invernaderos cubiertos vs calentamiento de terrenos descubiertos, y solamente pocos reportan el área real de calentamiento. Las principales cosechas son vegetales y flores; sin embargo en EE UU AA se ha aplicado para plantas productoras de semillas y en Islandia para plantíos de plátanos.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Acuicultura

La energía geotérmica para usos en acuicultura se ha incrementado con respecto a 2010 en un orden de 6.7% en cuanto a capacidad instalada y 2.7% en cuanto consumo anual. En 2015 la capacidad instalada era de 695 MWt mientras que el consumo suma los 11,958 TJ/año. De 21 países que utilizan la energía térmica para este sector, los líderes son EE UU AA, China, Islandia, Italia e Israel. Las principales especies cultivadas son tilapia, salmón y trucha aunque también se han utilizado para pescados tropicales, langostas y camarón. Las instalaciones son de uso intensivo y requieren personal altamente capacitado. El consumo de energía anual en 2015 alcanzó los 11,958 TJ/año, lo que representa un equivalente a 49.413 toneladas de producción, 2.7% más que en 2010.

Secado agrícola

Durante 2015, 15 países reportaron utilizar energía geotérmica para el secado de diferentes cosechas entre las que se encuentran una variedad de granos, vegetales y frutas. Los países que lideran esta práctica son Islandia (algas marinas), EE UU AA (cebolla), Serbia (trigo y otros cereales), El Salvador, Guatemala y México (fruta), Filipinas (carne de coco), Nueva Zelanda, Rumania y México (madera). Los países líderes son China, EE UU AA y Hungría. La capacidad instalada mundial en 2015 alcanzó los 161 MWt mientras que el consumo se estimó en los 2,030 TJ/año, representando un incremento del 28.8% y 24.2% con respecto a 2010.

Procesos de calentamiento a nivel industrial

En esta categoría se incluyen operaciones industriales que tienden a tener un gran consumo de energía, a menudo operan durante todo el año. Algunos ejemplos son "curado" de concreto (Guatemala y Eslovenia), embotellamiento de agua y bebidas carbonatadas (Serbia y Eslovenia), extracción química (Bulgaria, Polonia y Rusia), extracción de CO2 (Islandia y Turquía) procesamiento de pulpa y papel (Nueva Zelanda), extracción de sales y ioduro (Vietnam), producción de borato y ácido bórico (Italia).La capacidad instalada mundial en 2015 era de 610 MWt y el uso de energía anual alcanzó en ese año los 10,453 TJ/año, representando un incremento del 18 % y disminución del 12% respectivamente comparado con 2010.

Fusión de nieve y enfriamiento de espacios

En este rubro hay aplicaciones muy limitadas, los países donde se encuentra la mayor capacidad instalad son Islandia, Argentina, Japón y EE UU AA y es limitado en Polonia y Eslovenia. Durante 2015, la capacidad instalada fue de 360 MWt y el consumo anual de 2600 TJ/año. Las modalidades de bombas de calor y enfriamiento no se consideran en esta categoría.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Balnearios

En esta categoría los datos son más difíciles de colectar. Casi todos los países tienen spas y resorts que tienen albercas con calentamiento a base de energía geotérmica (incluyendo balneología y tratamientos terapéuticos) pero muchos de estos proyectos permiten que el agua fluya continuamente, independientemente de su uso (que puede incluir actividades nocturnas cuando los balnearios están cerrados). Por este motivo, el uso real y la capacidad instalada pueden ser mayores a las que se reportan.

En resumen, dentro de los 70 países que reportan tener balnearios y piscinas que utilizan energía geotérmica se incluyen países en desarrollo como Malasia, Mozambique, Singapur, y Zambia. La capacidad instalada reportada a nivel mundial en 2015 es de 9,140 MWt, mientras que el uso alcanza los 119,381 TJ/año para ese mismo año, es decir 36.4% y 9.1 % de incremento con respecto a 2010. También se incluyen los balnearios japoneses (onsens) que utilizan aguan caliente en primavera para los balnearios. Los países con mayor capacidad instalada son China, Japón, Turquía, Brasil y México.

Otros usos

En esta categoría la capacidad instalada alcanza los 79 MWt y el uso es de alrededor de 1452 TJ/año; 88 y 52% más que en 2010. Estos valores son reportados en 13 países e incluyen actividades como cría de animales de granja, cultivos de espirulina, desalado y esterilización de botellas. El país que reporta mayor consumo es Nueva Zelanda, donde la energía geotérmica se utiliza en la irrigación, protección de escarchas y parques turísticos geotérmicos.

3.2 Tendencias tecnológicas

La tecnología empleada en las distintas aplicaciones de los UDCG, se considera madura, probada y disponible a nivel comercial. No obstante, se identifican algunas áreas de oportunidad para reducir costos y mejorar la eficiencia de los equipos involucrados en el intercambio de calor que se emplean en las distintas aplicaciones. Entre las oportunidades que se encuentran están el desarrollo de materiales que mejoren la conductividad térmica, la formulación de agentes anticongelantes que sean ambientalmente amigables, fluidos con menor punto de congelación y menor viscosidad, así como el diseño de estructuras y geometrías de los colectores.

Adicionalmente, existen otros retos técnicos que corresponden a las etapas de identificación del recurso geotérmico y su exploración, entre los que se encuentran el desarrollo de nuevas herramientas, metodologías, procesos y equipos para hacer más eficientes y menos costosas las actividades de exploración y perforación. Al

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

respecto es relevante mencionar que no todos los proyectos de UDCG incluyen estas etapas.

En cuanto a las tecnologías que se vislumbran en desarrollo para aplicaciones de usos directos de calor, destacan aquellas que promueven el aprovechamiento de los sistemas convectivos hidrotermales con fluidos de mediana temperatura y el uso de plantas de ciclo binario más eficientes. También, a mediano plazo, se busca el desarrollo de tecnologías más confiables para empezar a explotar los sistemas de roca seca caliente, lo cual sin duda alguna, multiplicará los recursos disponibles y la capacidad instalada geotermoeléctrica así como la de los usos directos de calor (Santoyo-Gutierrez & Torres-Alvarado, Octubre 2010).

Derivado de la revisión de varios documentos sobre las tendencias tecnológicas para usos directos de calor geotérmico (DOE-US, 2004; IEA, 2011; European Technology Platform, 2013 y GEOTech, 2016), se identificaron los siguientes temas de investigación y desarrollo: (cabe mencionar que los referentes a exploración, perforación y explotación son aplicables solo a los proyectos de usos directos que incluyen estas fases).

Herramientas de exploración

- Recopilación de datos del suelo para diseño de sistemas cerrados y abiertos en bases de datos geográficos de fácil acceso.
- Desarrollo y/o mejora de nuevos métodos de exploración para sistemas hidrotermales y de roca seca caliente.
- Tecnologías de exploración y evaluación de yacimientos geotérmicos.

Reducción de costos de perforación y explotación

- Sistemas de perforación de barrena seca.
- Nuevos conceptos de perforación: horizontal, multi-pozos, sistemas en circuito cerrado.
- Desarrollo de instrumentación de fondo de pozo para el censado confiable de propiedades termodinámicas, geoquímicas y geológicas de los yacimientos, incluyendo la producción.
- Desarrollo y explotación de la geotermia somera.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Mejora de la eficiencia, confiabilidad y costo de la generación de calor.

- Mejores métodos de la construcción y terminación de pozos, control de inyección de pozos, tratamiento de agua.
- Mejora de materiales para bombas de calor: Nuevos plásticos que mejoren la conductividad térmica.
- Mejores agentes anticongelantes: Ambientalmente amigables, fluidos con menor punto de congelación, menor viscosidad y alta capacidad específica.
- Mejoras en diseño y construcción de bombas de calor.
- Mejora en materiales de construcción (colado de techos, conductividad térmica).
- Nuevos tipos y geometrías de colectores.
- Nuevas estructuras de ingeniería civil.

Temas transversales:

- Desarrollo y utilización de la geotermia somera. Herramientas de integración de diseño y modelado.
- Sistemas de almacenamiento de energía térmica del subsuelo.
- Estudios de impacto ambiental y de salud de los proyectos, incluidos riesgos asociados a la sismicidad inducida por los proyectos de explotación de los sistemas geotérmicos mejorados.

3.3 Políticas de incentivos a nivel internacional

Las barreras que enfrentan los diferentes proyectos geotérmicos a nivel mundial, se centran en aspectos de tipo económico, de mercado, e indefiniciones regulatorias. En varios países europeos se han establecido diferentes esquemas de incentivos y mecanismos regulatorios con el fin de apoyar el crecimiento del uso de la energía geotérmica. La siguiente lista muestra regulaciones e incentivos para el desarrollo de energía renovable en general, que aplican para proyectos geotérmicos incluidos los correspondientes a usos directos del calor (ESMAP, 2012). Las condiciones legales y regulatorias de estos incentivos incluyen los siguientes aspectos:

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

- Incentivos fiscales o subsidios gubernamentales para las fases de exploración y explotación (p. ej. Seguros de mitigación).
- Préstamos con bajo o cero interés
- Concesiones de las plantas de generación.
- Incentivos en tarifas.
- Esquemas de seguros para mitigar riesgos de perforación y otros esquemas de incentivos para disminuir los riesgos geológicos.
- Portafolio de estándares de energías renovables.
- Políticas y leyes de energías renovables, dando prioridad al desarrollo del recurso geotérmico y sitios específicos privilegiados.
- Diferentes tipos y definiciones claras de autorizaciones y permisos (ej. Permisos de exploración, concesiones a largo plazo), reglas, procesos, costos/rentas/tarifas, expectativas de desarrollo, guías y mecanismo de mercado.
- Definición de las áreas superficiales de exploración y explotación, definiciones en uso de yacimientos compartidos y uso de suelo.

Como parte de un análisis sobre el marco regulatorio de proyectos de usos directos de calor geotérmico en diferentes países europeos (Sander, Abril 2015), se señala que el rol de los gobiernos es decisivo para el desarrollo de la geotermia, debido a que el gobierno establece las condiciones legales y el marco financiero para el mercado, además de los mecanismos necesarios para involucra al sector privado, a los institutos de investigación, instituciones políticas, y promueve el desarrollo de las capacidades recursos humanos para impulsar la geotermia. Los cambios en los esquemas de subsidios y condiciones de mercado como son "*Fonds Chaleur*" de Francia y el Programa de Incentivos del Mercado en Alemania demuestran que el estado es decisivo para crear y desarrollar el mercado y venta de productos de tecnologías de energías renovables, incluyendo las que están asociadas a UDCG. En Suecia, esquemas de soporte como el Ground Source Heat Pumps (GSHP por sus siglas en inglés) lograron que durante las décadas de 1980´s y 1990´s tanto casas individuales como multifamiliares tuvieran los medios e instrumentos fiscales para abastecer su energía a partir de la instalación de bombas de calor.

Por otro lado, los esquemas de subsidios y aplicables en la construcción de casas, instituciones públicas, edificios de oficinas y sistemas de calentamiento distrital, han sido directamente influenciados por la comercialización de sistemas almacenamiento de energía térmica como el UTES (Underground Thermal Energy Storage), BTES (Borehole Thermal Energy Stotrage) o el ATES (Aquifer Thermal Energy

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Storage). La crisis del petróleo también ha influido en el crecimiento del mercado de UDCG en varios países europeos.

En el caso de Estados Unidos, la Ley de Recuperación y Reinversión Americana de 2009 (ARRA) proporcionó miles de millones de dólares en fondos para la industria de energía renovable en forma de créditos fiscales, donaciones federales y préstamos. Para las actividades geotérmicas solo en el DOE, ARRA asignó unos $400 millones en fondos de estímulo. Así mismo, otros esquemas como son el Crédito de Impuesto a la Producción Federal (PTC), el Crédito Tributario Federal de Inversiones (ITC) y las *Renewable Energy Grant* otorgado por el Departamento de Tesorería de los E.E. U.U han llamado la atención de los desarrolladores de proyectos geotérmicos porque proporcionan a las compañías importantes incentivos financieros (Jeenejohn, 2009).

Otros incentivos federales adicionales al PTC e ITC están disponibles para el desarrollo de recursos geotérmicos domésticos en ese país, así como subvenciones en efectivo. En una revisión realizada por la Asociación de Energía Geotérmica (GEA, por sus siglas en inglés) se identificaron al menos 12 tipos de incentivos federales para la producción de la energía geotérmica. Todos estos incentivos federales son aplicables para el producción de electricidad a partir de recursos geotérmicos y 4 de ellos aplican para el desarrollo de proyectos geotérmicos de uso directo de calor. Si bien, algunos de los incentivos federales existen desde hace algún tiempo (el PTC se promulgó en 1992) muchos de estos incentivos se han implementado en los últimos seis años o se han aplicado a energía geotérmica solo recientemente. Además, los incentivos más antiguos han sido modificados por legislación más reciente, como es el caso del ITC o el PTC.

Si bien, las políticas financieras federales pueden ser catalizadores valiosos para el desarrollo de proyectos geotérmicos, también hay incentivos significativos provenientes de los gobiernos estatales. De hecho, muchas políticas estatales proporcionan incentivos sustanciales para el desarrollo de la geotermia.

En cuanto a las políticas energéticas de los estados que cuentan con recursos geotérmicos (Alaska, Arizona, California, Colorado, Hawai, Idaho, Montana, Nevada, Nuevo México, Oregón, Utah y Washington), la GEA identificó al menos 38 incentivos para promover el desarrollo de recursos geotérmicos.

Otra serie de incentivos menos específicos en cuanto el tipo de las tecnología de energía renovable también están disponibles a nivel estatal y / o local.

Ejemplos de incentivos para el desarrollo de energías renovables, entre las que se incluyen algunas que son específicas para el caso de energía geotérmica que se han promovido en Estados Unidos se encuentran los siguientes:

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Concesiones

- Solicitud de Información: Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada - Energía (Ronda II) ($ 400 M).
- Programa de Tecnologías Geotérmicas: Bombas de calor de origen terrestre ($ 50 M).
- Investigación y desarrollo / análisis de componentes de sistemas geotérmicos mejorados ($ 56 M).
- Programa de Tecnologías Geotérmicas: Validación de Tecnologías de Exploración Innovadoras; Producción de energía geotérmica; Desarrollo, recopilación y mantenimiento de datos geotérmicos ($ 170 M).
- Demostraciones mejoradas de sistemas geotérmicos ($ 90 M).
- Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada - Energía ($ 400 M).
- Science: Small Business Innovation Research Phase I ($ 37 M).

Garantías de Préstamos

- Garantía Federal de Préstamo para Proyectos de Energía Renovable de Tecnología Comercial ($750M).
- Eficiencia Energética Innovadora, Energía Renovable y Tecnologías Avanzadas de Transmisión y Distribución (2009) ($ 8500 M).
- Programa de Asociación de Instituciones Financieras (FIPP) ($ 750 M).

Cabe mencionar que la experiencia de varios países indica que tanto el marco legal y regulatorio necesitan ser conducidos tomando en cuenta todos los aspectos que estén involucrados en el desarrollo del mercado de los UDCG de forma clara y consistente, y deben contribuir a resolver las brechas, confusiones y dificultades que pueden presentarse cuando el marco legal se contrapone con aspectos técnicos y de mercado.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

3.4 Aspectos relacionados con costos de inversión de los proyectos de UDCG

Los proyectos geotérmicos en general, tienen mayor riesgo que los proyectos de energías renovables convencionales, no solamente por la incertidumbre de cuantificar el recurso geotérmico, sino también porque involucran altos costos de inversión para poder contar con el recurso del subsuelo.

En gran parte de los casos, la factibilidad de los proyectos de usos directos del calor es altamente dependiente de las características del recurso geotérmico y de que su aplicación conlleve a un uso económicamente competitivo. Aunque las instalaciones representan altos costos de inversión, sus costos de operación son significativamente menores comparados con los proyectos de energías renovables convencionales, además de que existen configuraciones de sistemas de UDCG que tienen retornos de inversión atractivos que aumentan la rentabilidad de los proyectos, como es el caso de los sistemas en cascada, en el que los costos de inversión se distribuyen en las diferentes aplicaciones. De esta forma, los parámetros que impactan el caso de negocio de las instalaciones de UDCG, incluyen características poco comunes que no se consideran en proyectos de otras energías renovables convencionales (Jóhannesson & Chatenay, 2014a).

En este sentido, es necesario identificar todos los aspectos que deberán incluirse como parte del estudio de factibilidad de un proyecto; así como la estimación de costos que involucra la ejecución de cada etapa del proyecto de UDCG. A manera de resumen, en la siguiente tabla se indican los elementos que se consideran medulares en cada una de las etapas de la cadena de valor de los proyectos de UDCG, para estimar el costo del proyecto:

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Tabla 3. Aspectos a considerar en la estimación de costos de los proyectos de UDCG

Etapa del proyecto	Elementos considerados en la estimación de costos	
Desarrollo de campos: Identificación y exploración	• Evaluación del recurso • Diseño preliminar para el uso del recurso geotérmico • Costos estimados de inversión, operación y mantenimiento • Plan de desarrollo	
Diseño y construcción	**Costos directos:** • Ductos de conexión y de reinyección. • Equipo mecánico y de control para manejo y control del fluido geotérmico. • Equipo mecánico y de control directamente involucrado con las aplicaciones. • Instalaciones y servicios.	**Costos indirectos:** • Ingeniería, supervisión y comisionamiento. • Contingencias de los proyectos. • Partes de repuesto. • Concesiones y costos de terrenos. • Permisos oficiales. • Seguros
Operación y mantenimiento	• Personal • Consumibles y partes de repuesto • Mantenimiento • Licencias, impuestos y seguros • Pozos de reemplazo	

Fuente: Elaboración propia a partir de (Johannesson & Chatenay, 2014)

Gastos de capital típicos

El desarrollo de un campo puede durar desde la fase de exploración y generalmente continúa en paralelo con las actividades relacionadas con la instalación (downstream). Este desarrollo incluye la perforación de los pozos de producción y de reinyección además de las pruebas y preparación de las conexiones de los componentes de las instalaciones para las diferentes aplicaciones.

El desarrollo de campos se conduce de acuerdo con la estrategia establecida en las primeras etapas y regularmente se revisa en las etapas siguientes por medio pruebas en tiempo real de la simulación de yacimientos que se va ajustando por iteraciones en donde se va obteniendo mayor información con el fin de obtener una foto real del yacimiento y del recurso geotérmico así como su capacidad a largo plazo.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

El desarrollo de campos es muy importante para el proyecto ya que permite la verificación de la evaluación preliminar del recurso. También, parte del riesgo del proyecto en términos de inversión involucrada y la incertidumbre pueden estimarse en esta etapa.

El tiempo y la inversión requerida para el desarrollo completo de un campo geotérmico varían considerablemente de un campo a otro dependiendo de los parámetros tales como la profundidad de los pozos, el recurso geológico y la disponibilidad y capacidad de los equipos de perforación.

Para proyectos que requieren perforación, el estudio de factibilidad *bancable* está basada en la primera exploración del pozo y toma en cuenta los resultados de las pruebas de pozo.

Los costos directos de inversión involucrados en estas etapas conciernen principalmente a los siguientes aspectos:

- Infraestructura: caminos, trayectoria de pozos, etc.
- Perforación y pruebas de pozo.
- Equipo requerido para los pozos y su conexión con las instalaciones downstream.

Instalación downstream

La instalación *downstream (aguas abajo)* abarca el diseño, construcción/instalación y comisionamiento de todo el equipo, instalaciones y servicios requeridos para la explotación del recurso geotérmico de acuerdo al objetivo del proyecto.

Los componentes requeridos para las diferentes aplicaciones de usos directos varían dependiendo de la aplicación y pueden considerar los siguientes aspectos:

- Tuberías de conexión y reinyección incluyendo componentes mecánicos y de control de equipo para manejar y controlar el fluido geotérmico: válvulas, bombas, filtros, etc.
- Equipo mecánico y de control directamente involucrado con el manejo de calor:
    - Intercambiadores de calor, tanques, calderas de carga máxima, ductos de transporte y distribución y conexiones.
- Equipo mecánico y de control directamente involucrado con la aplicación:
    - Intercambiadores de calor, bombas, control de temperaturas.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

El diseño conceptual se plantea desde que los pozos de prueba están siendo perforados. Los procedimientos pueden variar de un proyecto a otro dependiendo de las especificaciones. Los servicios generalmente se licitan como ya sea como servicios de Procura y Construcción (PC) o Ingeniería-Procura-Construcción (IPC).

Los costos directos de inversión involucrados en esta etapa están relacionados principalmente con la procura y construcción/instalación de:

- Ductos de conexión y de reinyección.
- Equipo mecánico y de control para manejo y control del fluido geotérmico.
- Equipo mecánico y de control directamente involucrado con las aplicaciones.
- Instalaciones y servicios.
- Costos indirectos

Los costos indirectos más importantes incluyen:

- Ingeniería, supervisión y comisionamiento.
- Contingencias de los proyectos.
- Partes de repuesto.
- Concesiones y costos de terrenos.
- Permisos oficiales.
- Seguros
- Etc.

Gastos de operación y mantenimiento

Los costos de operación y mantenimiento de las aplicaciones de usos directos de calor son altamente dependientes del tipo de aplicación, su tamaño y características. Los componentes principales se mencionan a continuación:

- Personal
- Consumibles y partes de repuesto
- Mantenimiento
- Licencias, impuestos y seguros
- Pozos de reemplazo

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Beneficios

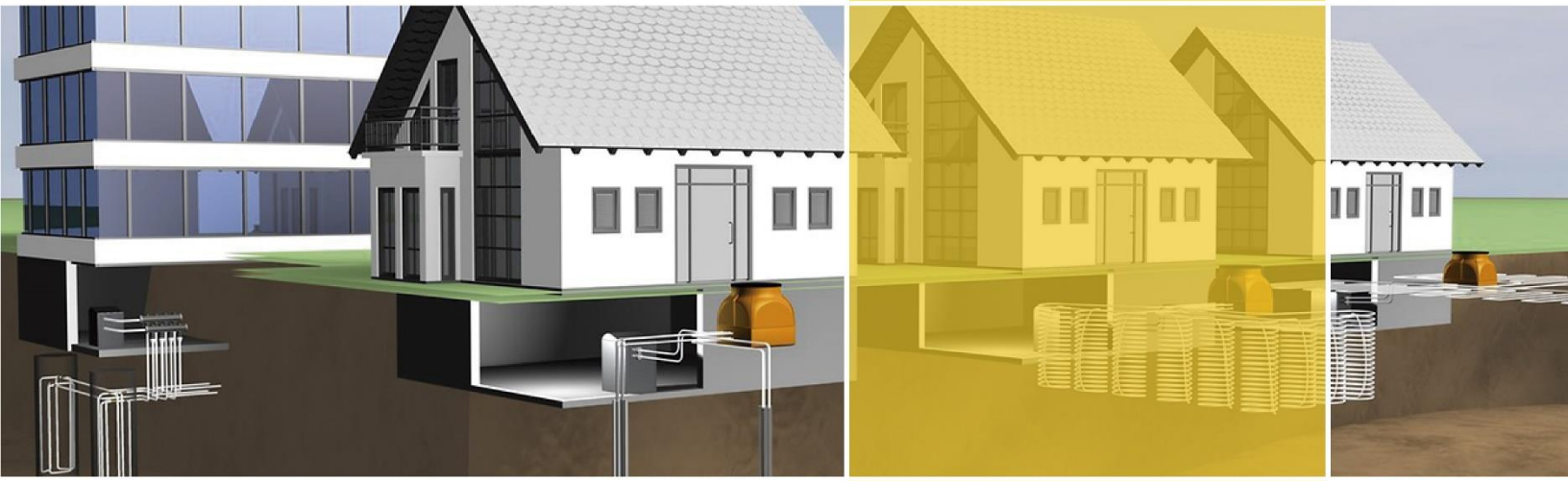
Los aspectos que generan dividendos en los proyectos de recursos geotérmicos varían dependiendo de la naturaleza de la aplicación. En algunos casos, la energía o el agua se venden directamente a usuarios finales mientras que en otros casos, los recursos geotérmicos contribuyen a una parte del proceso de producción de un producto final completamente diferente. Los usos en cascada son una buena opción para aumentar la rentabilidad de los proyectos bajo la consideración de que la estimación de costos tanto de inversión como de operación es más complicada que para los proyectos que involucran una sola aplicación.

Los productos finales, o el producto de venta para el desarrollador del proyecto después de haber utilizado los recursos geotérmicos en un proceso, pude ser (no exhaustivo):

- Energía para calentamiento espacial, derretimiento de nieve, aplicaciones industriales, entre otras.
- Agua caliente o fluido geotérmico para balnearios, acuacultura, agricultura, aplicaciones industriales y también para calentamiento de espacios dependiendo del método de medición de tarifas.
- Productos agrícolas: vegetales, frutas, plantas de ornamento y secado de comida o bienes.
- Productos de pesca.
- Sales y minerales.
- Productos finales de varias industrias en las que los recursos geotérmicos pueden ser parte de sus procesos.

En resumen, las ganancias de las distintas aplicaciones de usos directos de calor geotérmico están directamente vinculadas con el producto final por aplicación y de las características del yacimiento y del recurso geotérmico.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.



4. ENTORNO NACIONAL

4 ENTORNO NACIONAL

México dispone de un gran potencial de recursos geotérmicos que pueden ser aprovechados a través de las distintas aplicaciones de los UDCG; sin embargo, aunque el empleo de estas aplicaciones se considera factible, su desarrollo es incipiente.

En México, la energía geotérmica se utiliza en casi su totalidad para la generación de electricidad. Los usos directos de calor están en desarrollo y actualmente se concentran en instalaciones como balnearios (baños y albercas) (Gutiérrez Negrín et al, 2015).

Aunque México ocupa a nivel mundial el cuarto lugar en capacidad instalada para generación de electricidad con energía geotérmica los usos directos en el país son marginales (156 MWt) y representan el 0.2% de la capacidad instalada mundial, y una fracción muy pequeña de los recursos geotérmicos nacionales de baja y mediana temperatura (Torres Luna et al, 2016).

Casi todos los *resorts* y albercas han sido desarrollados y son operados por inversionistas privados. Hay algunas instalaciones que son operadas por el gobierno federal, estatal o municipal, a través de la secretaría de turismo o, en algunos casos, a través de instituciones federales como el IMSS.

La CFE ha desarrollado algunas aplicaciones de usos directos en el campo Los Azufres, incluyendo secado de madera, deshidratación de frutas y vegetales, climatización para invernaderos y sistemas de calentamiento para sus oficinas e instalaciones en dicho campo, aunque la mayoría de estos proyectos han sido descontinuados.

Actualmente, el uso de bombas de calor es nulo pero se están sentando las bases para la introducción de esta tecnología en el país, a través de proyectos demostrativos a cargo del CEMIE- Geo (Torres Luna et al, 2016).

En esta sección se presenta un resumen del potencial de aprovechamiento de los usos directos, la capacidad instalada actual y la legislación relacionada con los usos directos.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

4.1 Potencial de aprovechamiento

Actualmente, no se dispone de datos oficiales actualizados del potencial geotérmico específico para usos directos en México, pero existe información que puede ser utilizada para estimar los recursos existentes, entre esta se encuentra la siguiente:

- Inventario Nacional de Energías Limpias (INEL).
- Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (AZEL).
- Estimaciones y estudios realizados por diferentes autores sobre el potencial geotérmico en México.

Por otro lado, el flujo residual de las centrales geotermoeléctricas puede ser reutilizado a través de aplicaciones de usos directos de calor en cascada, lo cual disminuye los costos asociados a la exploración del recurso geotérmico. En México, existen cinco campos geotérmicos cuyo fluido residual puede ser aprovechado. A continuación se presenta la información referente a la localización de las plantas y capacidad instalada actual.

Tabla 4. Centrales geotérmicas localizadas en México

Estado	Municipio	Nombre	Productor	Unidades	Capacidad instalada (MW)	Generación (GWh/a)
Baja California	Mexicali	Central Cerro Prieto	CFE	9	570	3,739.30
Puebla	Chignautla	Los Humeros	CFE	9	80.4	478.34
Michoacán	Cd. Hidalgo	Los Azufres	CFE	14	225	1806.72
Baja California Sur	Mulegé	Las Tres Vírgenes	CFE	2	10	53.70
Nayarit	San Pedro Lagunillas	Geotérmica para el Desarrollo	Privado	3	35	95.42
Total					920.4	6,173.48

Fuente: INERE con datos de 2015.

Por otro lado, el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE) reporta 267 sitios geotérmicos con potencial probable para la generación de electricidad los cuales 255 son de media y baja entalpía, y por lo tanto susceptibles de ser aprovechados mediante los usos directos de calor geotérmico. En la tabla siguiente se presenta esta información

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Tabla 5. Recursos geotérmicos identificados en el territorio mexicano

Tipo de recurso	Sitio identificado	Capacidad instalable (MW)
Alta Entalpía	2	60.01
Media entalpía	44	291.47
Baja entalpía	211	888.17
Estudios	10	3983.38
Total	**267**	**5223.03**

Fuente: INERE con datos de 2015.

De acuerdo con el INERE, en el país existen vastos recursos geotérmicos de mediana y baja entalpia que pueden ser aprovechados a través de los usos directos. Estos datos son congruentes con estudios realizados previamente por diferentes investigadores en el área. En la Tabla 6 se presenta el resumen de estos.

Tabla 6. Principales estudios publicados enfocados en la identificación de recursos geotérmicos

Autor	Año	Capacidad instalada (MW)	Principales premisas y bases de la estimación	Total de (MW)
Alonso, H.	1975	75	Se asumió un potencial de 500 MW en Cerro Prieto, 100 MW en diversas zonas estudiadas y 75 MW en cada una de las zonas descubiertas hasta esa fecha.	4,000
Mercado, S.	1976	75	Método volumétrico con base en características geoquímicas de las manifestaciones conocidas en esa fecha.	13,110
Alonso, H.	1985	170	Estimación geológica. Estimó Reservas probadas 1340 MW, probables 4600 MW y posibles de 6000 MW.	11,940
Mercado et al.	1985	170	Método volumétrico estimando recursos de temperaturas intermedias (125- 135°C) en dos zonas del país: centro 3600 km^2 y 2 km de espesor) y sur (2000 km^2 y 1.5 km de espesor).	45,815
Iglesias & Torres	2009	958	Estimación calor almacenado a 3 km método volumétrico y Montecarlo para el 21% de las 1310 manifestaciones reportadas (1993) de temperatura baja a intermedia en 20 estados.	77-86 (EJ térmicos)
Ordaz et al.	2011	958	Método volumétrico sobre 1300 localidades de baja a alta temperatura. Reservas probadas: 186 MW, probables: 2077 MW, posibles: 7423 MW.	9,686

Fuente: (Hiriat, 2011)

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

De acuerdo con Hiriart (2011), México cuenta con más de 1300 sitios que la CFE exploró entre 1960 y 1990, representando un potencial geotérmico superior a los 10 mil MWe. Adicionalmente, se identificaron dos estudios que hacen referencia al potencial de recursos, uno de ellos corresponde al publicado por Vicente Torres en los años noventas (Torres et al; 1993), en donde se estimaron los recursos de media y baja temperatura (< 200°C) disponibles en el país. En este documento se reporta un potencial aprovechable para UDCG. Adicionalmente, existe un inventario de focos termales con recursos de temperaturas mayores a 28°C que incluye el censo de ~2,332 manifestaciones geotérmicas, distribuidas en 27 estados de la república.

Por otra parte, de acuerdo con Iglesias & Torres (2003) en México han sido realizadas evaluaciones preliminares de reservas geotérmicas en 276 manifestaciones hidrotermales. A partir de estos estudios se estimó que las reservas de estos sitios están en el intervalo de 7.7×10^{16} y 8.6×10^{16} kJ. La distribución de temperaturas asociadas en estos sitios está entre 60 °C y 180 °C. Se estima que las cantidades de energía recuperables estén entre 3.08×10^{17} y 3.45×10^{17} kJ (esto es, de 8.56×10^{10} a 9.58×10^{10} MWt).

4.2 Capacidad instalada

Como se ha mencionado, en México el aprovechamiento de los recursos geotérmicos a través de los usos directos es marginal y casi en su totalidad es destinado a balneología. De acuerdo con Gutiérrez-Negrín et al (2015), la capacidad instalada es de 156MWt, mientras que el uso anual de la energía es de 4171.004 TJ/año.

A continuación, en la tabla 7 se presenta la capacidad instalada y consumo anual de las diferentes aplicaciones directas de calor geotérmico (Gutiérrez-Negrín, Maya-González, & Quijano-León, 2015).

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Tabla 7. Capacidad instalada a nivel nacional de usos directos del calor geotérmico, 2013

Uso	Capacidad instalada (MWt)	Consumo anual de energía (TJ/año)	Factor de Capacidad
Calefacción de espacios individuales [1]	0.460	4.397	0.303
Acondicionamiento de Invernaderos	0.004	0.028	0.210
Secado de cultivos[2]	0.007	0.067	0.300
Balnearios y albercas[3]	155.347	4166.512	0.850
TOTAL	155.819	4171.004	0.849

[1] Diferente a bombas de calor
[2] Incluye secado y deshidratación de granos, frutas y vegetales
Fuente: Adaptado de (Gutiérrez Negrín *et al;* 2015).

De acuerdo con la información indicada en la tabla anterior, la capacidad instalada a diciembre de 2013 era de 156 MWt, de la cual, la mayor parte correspondía a aplicaciones de balneología (resorts, baños y albercas.

Existen aplicaciones de UDCG que no han sido implementadas en el país como son: procesos industriales, piscicultura, granjas de animales, derretimiento de nieve, aire acondicionado y las bombas de calor geotérmico (Gutiérrez-Negrín et al; 2015). El uso de bombas de calor es mínimo y poco desarrollado, además no existe información disponible.

4.3 Proyectos piloto y proyectos de investigación

Los usos directos de calor han sido poco explotados en México, y se han utilizado en la balneología principalmente. Sin embargo, se han identificado proyectos piloto dirigidos a la agroindustria y la calefacción de espacios. A la fecha no se dispone de información oficial y consolidada sobre la capacidad instalada de los usos directos en el país. A continuación se presenta la información identificada.

Proyectos de CFE

Durante la década de los 80 y 90, la CFE implementó diversos proyectos piloto y demostrativos de usos directos de calor geotérmico. El objetivo principal de su desarrollo, fue atraer inversionistas nacionales y extranjeros así como demostrar la rentabilidad de los usos directos de la energía geotérmica (Sánchez & Casimiro, 1995).

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Estos proyectos se desarrollaron en tres campos geotérmicos: los Azufres, Los Humeros y Maguarichic. En tabla siguiente se presenta el resumen de los proyectos:

Tabla 8 Proyectos piloto y demostrativos realizados por la CFE

Campo geotérmico	Aplicaciones	Fuente del recurso geotérmico
Campo geotérmico los Azufres	➢ Horno de secado de madera ➢ Invernadero ➢ Deshidratador de frutas ➢ Calefacción de espacios	A partir del fluido residual de las plantas geotérmicas
Campo Geotérmico Los Humeros	Planta productora de Hongos	A partir del fluido residual de las plantas geotérmicas
Campo geotérmico Maguarichic	Aguas terapéuticas y balneología	A partir de pozos abandonados

Fuente: Elaboración propia a partir de (Sánchez & Casimiro, 1995), (Rangel, 1998), (SENER, 2017b)

Proyectos del CEMIE Geo

Con relación a las capacidades tecnológicas de soporte existentes en el país, el Gobierno Federal, creó en febrero de 2014, el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE-Geo), que es un consorcio integrado por 22 instituciones académicas y empresas privadas. El CEMIE-Geo es liderado por el CICESE y su objetivo es impulsar a nivel nacional la investigación el desarrollo tecnológico y la innovación en geotermia mediante la realización de proyectos específicos, en temas relacionados con la exploración, caracterización y explotación de sistemas geotérmicos de alta, media y baja entalpía para generación de electricidad y usos directos.

El CEMIE-Geo incorpora a una gran parte de las instituciones de educación superior y centros de investigación relacionados con la geotermia en México. Posee infraestructura relevante de laboratorios de vanguardia para la realización de análisis especializados, tanto para actividades de investigación y desarrollo de los miembros del consorcio, como para la industria.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Actualmente, el Centro está desarrollado treinta proyectos, los cuales están orientados hacia cuatro temas principales:

- Evaluación de los recursos geotérmicos nacionales
- Desarrollo e innovación en técnicas de exploración
- Desarrollos tecnológicos para la explotación
- Usos directos del calor geotérmico

Respecto a los usos directos, el CEMIE Geo se encuentra desarrollado los siguientes proyectos:

Tabla 9. Proyectos del CEMIE-Geo relacionados con los usos directos del calor geotérmico

Clave	Nombre del proyecto
Proyectos correspondientes a la línea estratégica "Exploración y mapeo del recurso geotérmico"	
P01	Mapas de gradiente geotérmico y flujo de calor para la República Mexicana
P02	Mapa de provincias geotérmicas de México a partir de la geoquímica de fluidos y distribución de acuíferos herramienta para la exploración y desarrollo de recursos geotérmicos convencionales.
P08	Desarrollo, implementación y aplicación de metodologías analíticas de procesos de interacción agua/roca en reservorios geotérmicos de baja y alta entalpía: aplicación en campos mexicanos
P09	Desarrollo y Aplicación de Nuevos Métodos Avanzados en Geoquímica de Fluidos y Alteración Hidrotermal para la Exploración de Sistemas Geotérmicos
Proyectos correspondientes a la línea estratégica "Uso directo del calor geotérmico"	
P10	Análisis de factibilidad y desarrollo de un prototipo de proyecto demostrativo del uso de energía geotérmica para climatización de invernaderos
P11	Desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía
P13	Análisis de factibilidad, comparación de tecnologías, estudio de mercado y desarrollo de un proyecto demostrativo de bombas de calor geotérmicas para acondicionamiento de espacios habitacionales y comerciales en las regiones centro y norte de México
P16	Integración de una planta de poli-generación mediante el uso en cascada de la energía geotérmica
P22	Diseño de sistema modular para el acondicionamiento de espacios habitacionales mediante el aprovechamiento de la energía geotérmica
P27	Diseño, desarrollo y caracterización a detalle de un sistema de deshidratación de alimentos, con la calidad requerida por la industria alimentaria, con calor residual de campos geotérmicos
P30	Desarrollo de un sistema para la generación de clima controlado a partir del intercambio de calor con el subsuelo y el aprovechamiento de la inercia térmica de la corteza terrestre, con aplicaciones en complejos industriales, comerciales, públicos y domésticos
Proyectos específicos para formación de recursos humanos	
P00RH	Formación de recursos humanos de alto nivel especializado en geotermia, diplomados, maestría y doctorado

Fuente: (CEMIE-Geo, 2013)

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Finalmente, con base a una búsqueda realizada en bases de datos especializadas[3], se observa que las instituciones mexicanas con mayor número de publicaciones en revistas científicas arbitradas, en el tema de UDCG, incluyendo aplicaciones en cascada y bombas de calor, son: la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, la Universidad de Guanajuato y el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL).

5 MARCO REGULATORIO PARA LOS USOS DIRECTOS DE CALOR GEOTÉRMICO

Actualmente, en México el aprovechamiento de la energía geotérmica se encuentra regulado por la Ley de Energía Geotérmica y su Reglamento, publicados en el Diario Oficial de la Federación el 11 de Agosto y 31 de Octubre del 2014 respectivamente. El objeto de estos ordenamientos es establecer los requisitos, procedimientos y demás actos que permitan la realización de las actividades de Reconocimiento, Exploración y Explotación de Recursos Geotérmicos, para el aprovechamiento de la energía térmica del subsuelo dentro de los límites del territorio nacional, con el fin de generar energía eléctrica o destinarla a usos diversos(directos).

A continuación se presentan algunas leyes y reglamentos relacionados con los usos directos del calor geotérmico.

Tabla 10. Leyes y reglamentos relacionados con los usos directos del calor geotérmico

Documento	Objetivo	Publicación
Ley de Energía Geotérmica	Esta ley tiene por objetivo regular las actividades de reconocimiento, exploración y explotación de recursos geotérmicos.	11/agosto/2014
Reglamento de La ley de Energía Geotérmica	Ordenamiento que tiene por objeto establecer los requisitos, procedimientos y demás actos que permitan la realización de las actividades de Reconocimiento, Exploración y Explotación de recursos geotérmicos previstas en la Ley de Energía Geotérmica.	31/octubre/2014

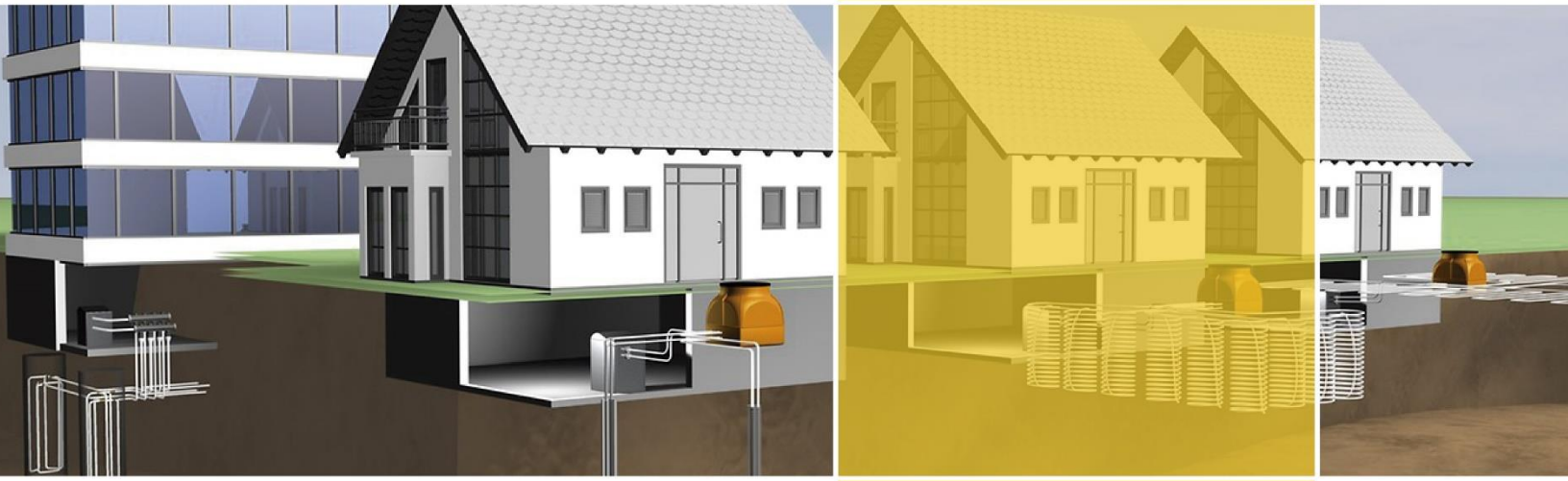
[3] Con base en una búsqueda realizada en junio de 2018, en Scopus, que es una base de datos especializada en publicaciones científicas y tecnológicas.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Documento	Objetivo	Publicación
Ley de Transición Energética	Ley que tiene por objeto regular el aprovechamiento sustentable de la energía así como las obligaciones en materia de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos.	24/12/2015
Ley de Aguas Nacionales	Esta ley tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable.	Última reforma 24/03/2016
Ley General de Cambio Climático	Tiene como objetivo regular, fomentar y posibilitar la instrumentación de la política nacional de cambio climático e incorporar acciones de adaptación y mitigación con un enfoque de largo plazo.	06/06/2012

Fuente: elaboración propia con información de (SENER, 2017b)

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.



ANEXOS

ANEXOS

Anexo 1. Estado actual de actividad en investigación y desarrollo

En esta sección se presentan los resultados de la bibliometría y análisis de patentes correspondiente a las áreas tecnológicas relacionadas con los usos directos del calor geotérmico.

La bibliometría es la aplicación del análisis cuantitativo y estadístico a publicaciones para evaluar el desempeño de la investigación (Thomson Reuters, 2008). Por ello, efectuar una bibliometría permite identificar información relevante sobre un tema (autores, instituciones, países, etc.) para entender el pasado, predecir el futuro y apoyar el proceso de toma de decisiones. Similarmente, el estudio de patentes es valioso para el análisis competitivo y de tendencias de la tecnología (Daim, Rueda, Martin, & Gerdsri, 2006).

La bibliometría de este reporte se realizó usando *Scopus*, la base de datos de resúmenes y citas que contiene publicaciones como revistas científicas, libros y registros de conferencias (Elsevier, 2016). Mientras que para el análisis de patentes se usó el portal de búsqueda de patentes Derwent Innovation que cubre más de 100 oficinas de propiedad intelectual.

El periodo de búsqueda para publicaciones y patentes se definió de 2000 a la fecha. Se probó una variedad de estrategias de búsqueda para obtener las publicaciones y patentes más relevantes sobre los temas. Finalmente, se analizaron los titulares para las patentes y los documentos por año, fuentes, autores, instituciones, países y tipo de documentos para las publicaciones.

Usos directos de calor (general)

La Figura 12 muestra el progreso en las publicaciones en el periodo 2000-2018. Durante el periodo indicado se publicaron 1,340 documentos. En los primeros cuatro años se observa un incremento en el número de publicaciones hasta alcanzar un pico de 64 publicaciones en el año 2003, posteriormente se mantiene un nivel de 40 a 60 publicaciones hasta el año 2010, a partir de este año se incrementan las publicaciones hasta alcanzar un pico de 96 documentos en el año 2012. A partir de 2014 se presenta un nuevo incremento hasta alcanzar 161 publicaciones en 2017. Al primer semestre del 2018 se identificaron 55 publicaciones, lo que representa un 34% con respecto al año anterior. De acuerdo a esto, se espera que la cantidad de publicaciones se mantenga estable o disminuya ligeramente con respecto al año anterior.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

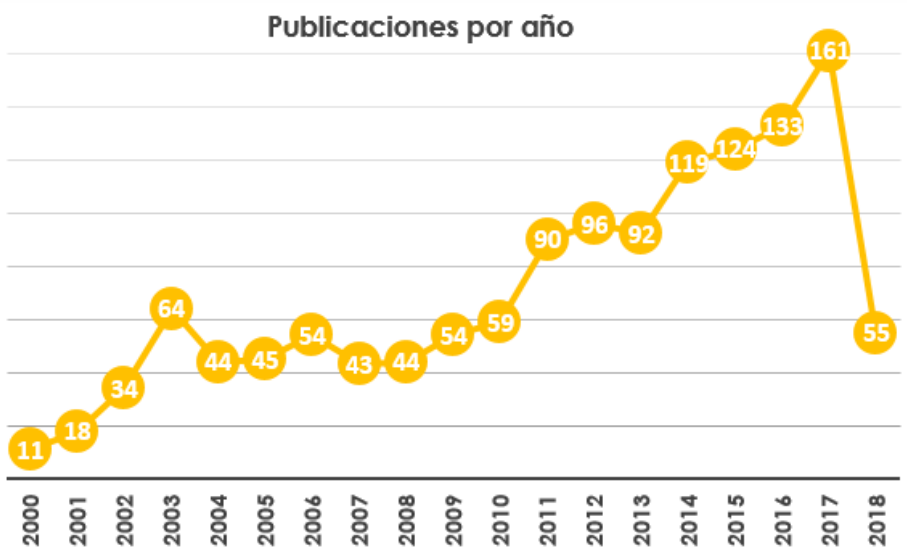


Figura 12. Progreso anual sobre las publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor

Fuente: Estudio bibliométrico, Junio 2018.

En la Figura 13 se presentan las 10 principales fuentes de publicación.

Figura 13. Fuentes con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor

Fuente: Estudio bibliométrico, Junio 2018.

La revista *Transactions Geothermal Resources Council* registra el mayor número de publicaciones (247) seguida por *Geothermics* (71). Las publicaciones *Renewable an Sustainable Energy Reviews y Journal of Volcanology and Geothermal Reseach* les siguen con 35 y 28 publicaciones respectivamente. El resto de las fuentes reporta menos de 20 publicaciones.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

La Figura 14 sugiere a los autores más activos en el tema. Lund J. W. es el autor que tiene mayor número de publicaciones (17), seguido de Hepbasli A. (11). Los autores Dinter I., Li K., Manzella A., Omer A.M. tienen 8 publicaciones. Los autores restantes poseen un número menor de publicaciones.

Figura 14. Autores con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

La Figura 15 presenta las 10 instituciones más importantes con base en el número de publicaciones registrado en los últimos 18 años.

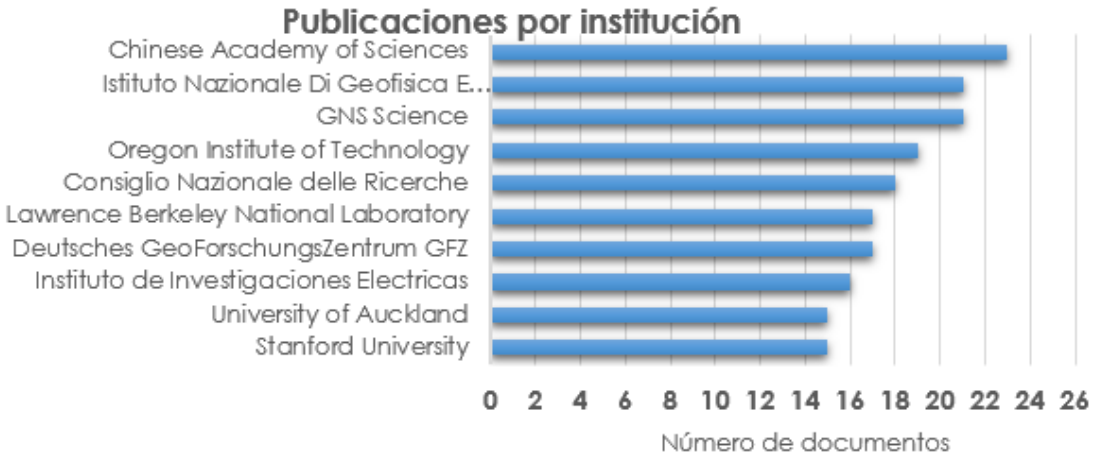


Figura 15. Organizaciones con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor

Fuente: Estudio bibliométrico, Junio 2018.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

La Chinese Academy of Sciences en China ocupa la primera posición con 23 publicaciones seguida del Istituto Nazionale Di Geofisica E Vulcanologia de Italia y GNS Science de Nueva Zelanda con 21 publicaciones cada una. El Oregon Institute of Technology cuenta con 19 publicaciones, mientras que el Consiglio Nazionale delle Ricerche tiene 18 publicaciones.

La Figura 16 indica que de las 1,340 publicaciones registradas en el periodo 2000-2018, el 53% (706) corresponden a artículos científicos. El segundo tipo de publicación son documentos de conferencias con 38% (513). En una menor cantidad la información se presenta en artículos de revisión (58) y libros y capítulos de libros (51). El resto de las publicaciones (12) corresponden a varios tipos de documentos incluyendo notas, editoriales, erratas, entre otros.

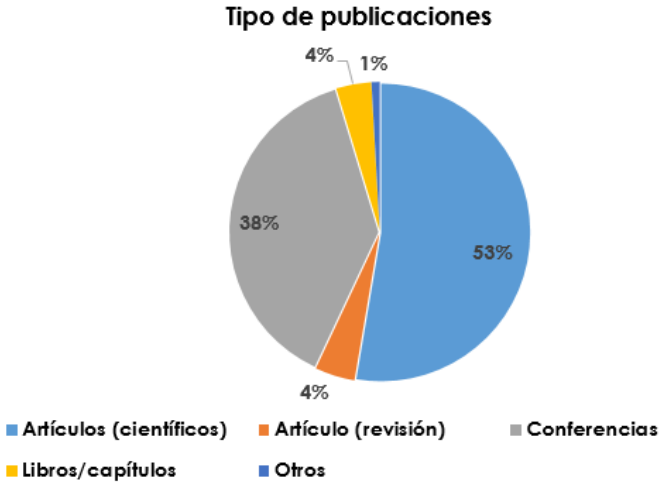


Figura 16. Tipo de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor

Fuente: Estudio bibliométrico, Junio 2018.

La Figura 17 muestra los 10 países con el mayor número de publicaciones en los últimos 18 años. Estados Unidos, China, Alemania e Italia encabezan la lista con 377, 108, 96 y 95 publicaciones, respectivamente. Con menor número de publicaciones les siguen Reino Unido con 74, Canadá con 65, Australia con 58, Japón con 57, Nueva Zelanda con 50 y Turquía con 48. México ocupa el onceavo lugar con 46 publicaciones.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

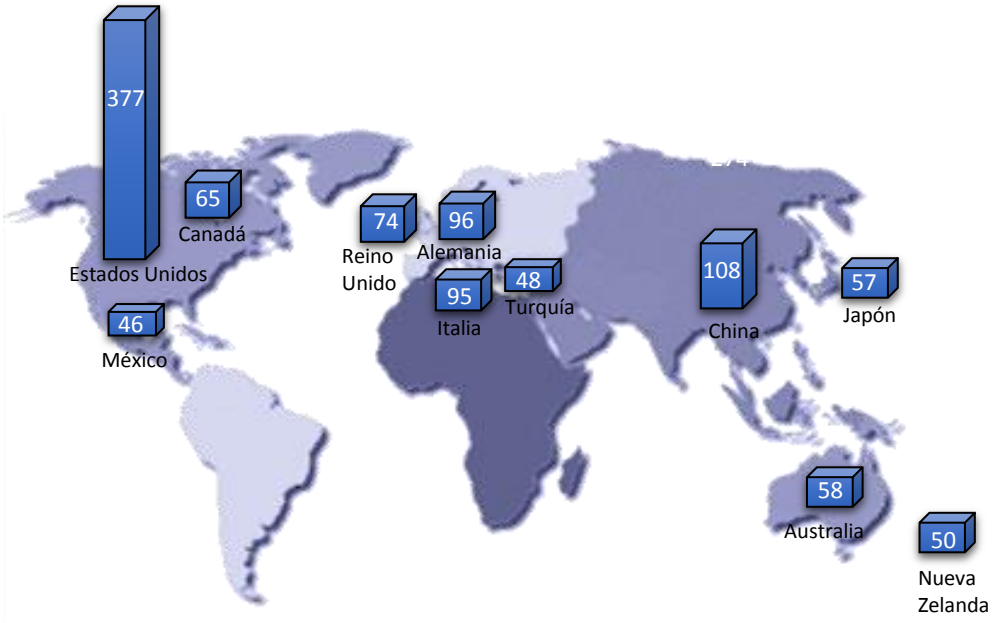


Figura 17. Países con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor

Fuente: Estudio bibliométrico, Junio 2018.

Aplicaciones en cascada

La Figura 18 muestra el progreso en las publicaciones en el periodo 2000-2018. Durante el periodo indicado se publicaron 129 documentos. En los primeros tres años se observa un incremento en el número de publicaciones hasta alcanzar un pico de 8 publicaciones en el año 2003, posteriormente se mantiene un nivel de 3 a 7 publicaciones hasta el año 2013 donde se alcanza un pico de 12 publicaciones. En el 2014 solo se reportan 6 publicaciones pero en 2015 se alcanza el mayor número de publicaciones en el periodo analizado (19). En el siguiente año nuevamente disminuyen las publicaciones a 11. Al primer semestre del 2018 se identificaron 10 publicaciones, lo que representa un 77% con respecto al año anterior (13). De acuerdo a esto, se espera que la cantidad de publicaciones se incrementen con respecto al año anterior.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

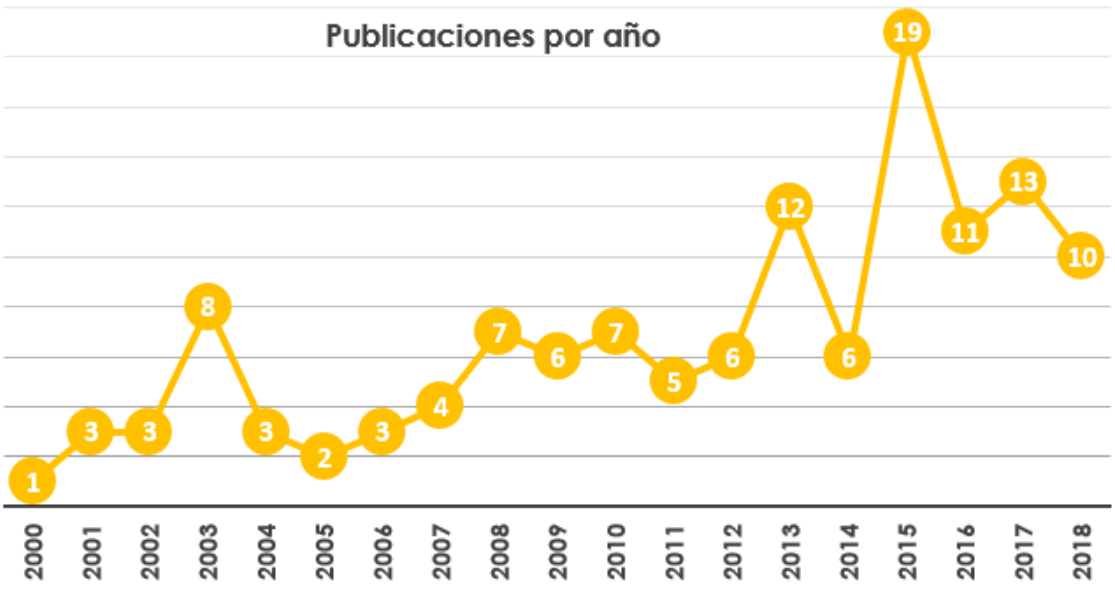


Figura 18. Progreso anual sobre las publicaciones relacionadas con el tema de aplicaciones en cascada

Fuente: Estudio bibliométrico, Junio 2018.

En la Figura 19 se presentan las 10 principales fuentes de publicación.

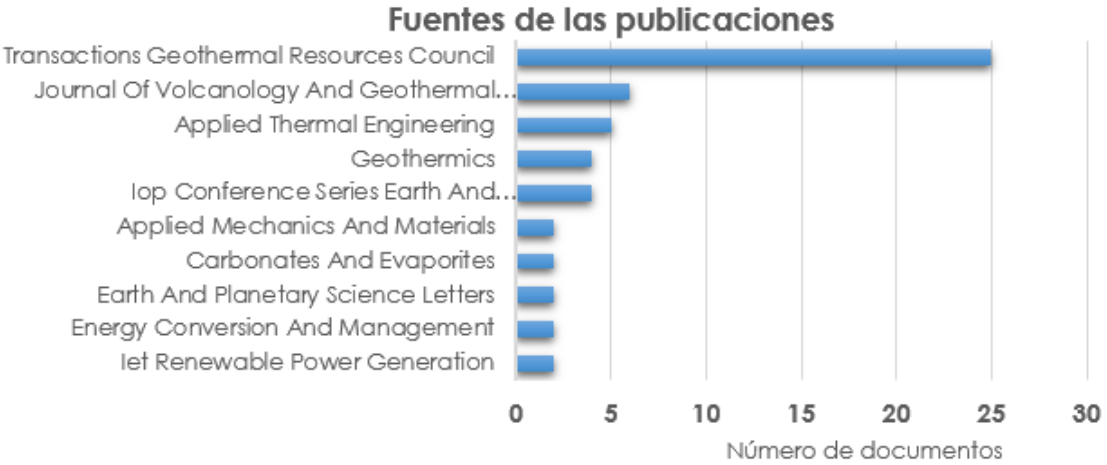


Figura 19. Fuentes con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de aplicaciones en cascada

Fuente: Estudio bibliométrico, Junio 2018.

La revista *Transactions Geothermal Resources Council* registra el mayor número de publicaciones (25) seguida por *Journal Of Volcanology andGeothermal Research*

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

(6), Aplied Thermal Engineering (5), Geothermics (4) e Iop Conference Series Earth and Environmental Science (4). El resto de las fuentes reporta dos publicaciones

La Figura 20 sugiere a los autores más activos en el tema. Dell R. es el autor que tiene mayor número de publicaciones (17), seguido de Wei C.S. (11). Los autores Mariner R.H., Rubio Maya C., Unnthorsson R. y Foley W. tienen 8 publicaciones. Los autores restantes poseen un número menor de publicaciones.

Figura 20. Autores con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de aplicaciones en cascada

Fuente: Estudio bibliométrico, Junio 2018.

La Figura 21 presenta las 10 instituciones más importantes con base en el número de publicaciones registrado en los últimos 18 años.

Figura 21. Organizaciones con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de aplicaciones en cascada

Fuente: Estudio bibliométrico, Junio 2018.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

La *United States Geological Survey Western Region* ocupa la primera posición con 10 publicaciones seguida de la Universidad de Tiajin con 8 publicaciones y la Universidad de Islandia con 7 publicaciones. El resto de instituciones cuenta con 5 o menos publicaciones.

La Figura 22 indica que de las 129 publicaciones registradas en el periodo 2000-2018, el 55% (71) corresponden a artículos científicos. El segundo tipo de publicación son documentos de conferencias con 40% (52). En una menor cantidad la información se presenta en artículos de revisión (5) y libros y capítulos de libros (1).

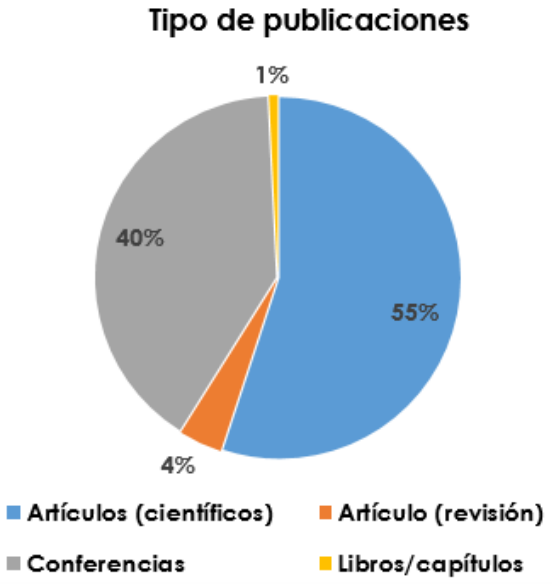


Figura 22. Tipo de publicaciones relacionadas con el tema de aplicaciones en cascada

Fuente: Estudio bibliométrico, Junio 2018.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

La Figura 23 muestra los 10 países con el mayor número de publicaciones en los últimos 18 años.

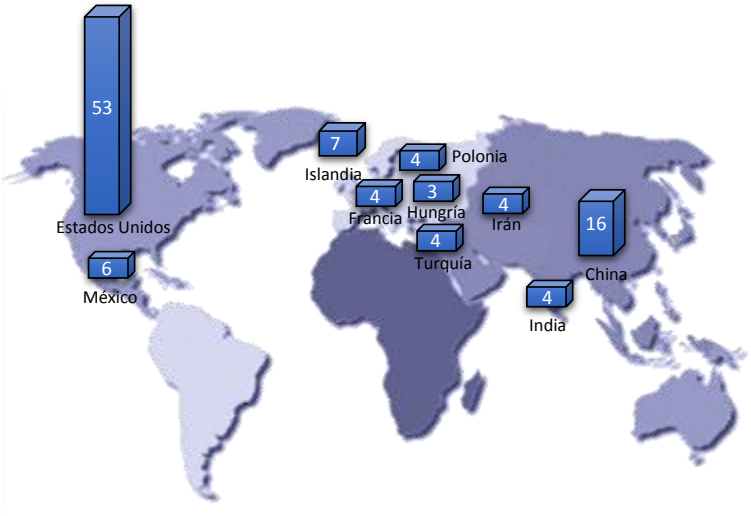


Figura 23. Países con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de aplicaciones en cascada

Fuente: Estudio bibliométrico, Junio 2018.

Estados Unidos, China, Islandia y México encabezan la lista con 53, 17, 7 y 6 publicaciones, respectivamente. Con menor número de publicaciones les siguen Francia, India, Irán, Polonia y Turquía con 4 y finalmente Hungría con 3.

Aplicación: calentamiento

La Figura 24 muestra el progreso en las publicaciones en el periodo 2003-2018. Durante el periodo indicado se publicaron 114 documentos, observándose tres comportamientos abruptos, con picos de aumento en las publicaciones; el primero en 2006, el segundo en 2008 y el tercero en 2015. El máximo número de publicaciones se presenta en el año 2015 con 23 unidades. Al primer semestre del 2018 se identificaron 3 publicaciones, lo que representa un 25% con respecto al año anterior. Por lo tanto, se espera que la cantidad de publicaciones se mantenga o continúe en aumento.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

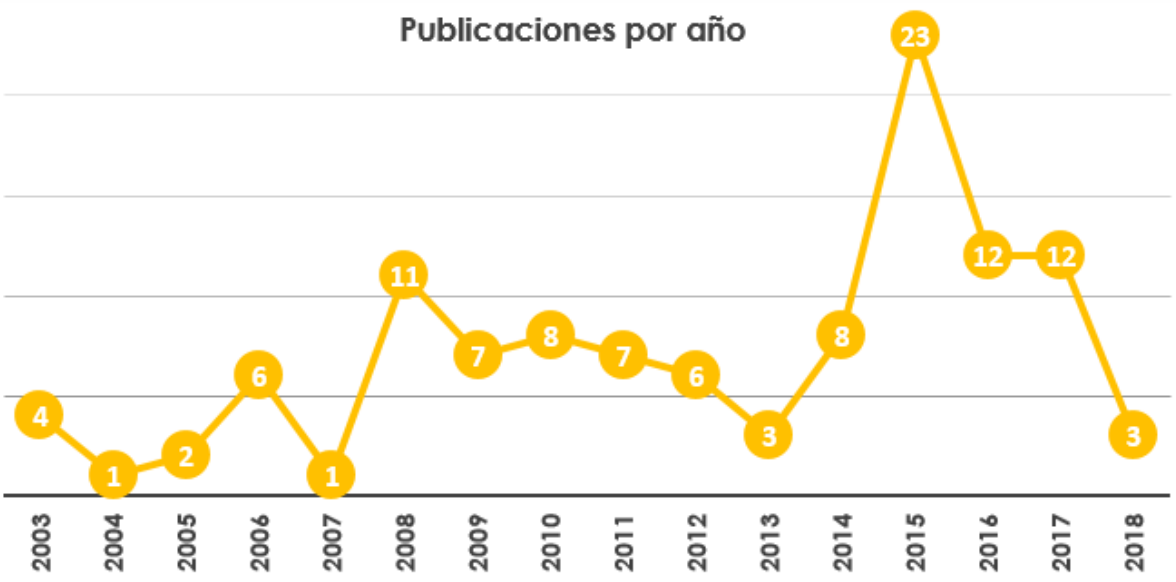


Figura 24. Progreso anual sobre las publicaciones relacionadas con el tema de calentamiento

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

En la Figura 25 se presentan las 10 principales fuentes de publicación.

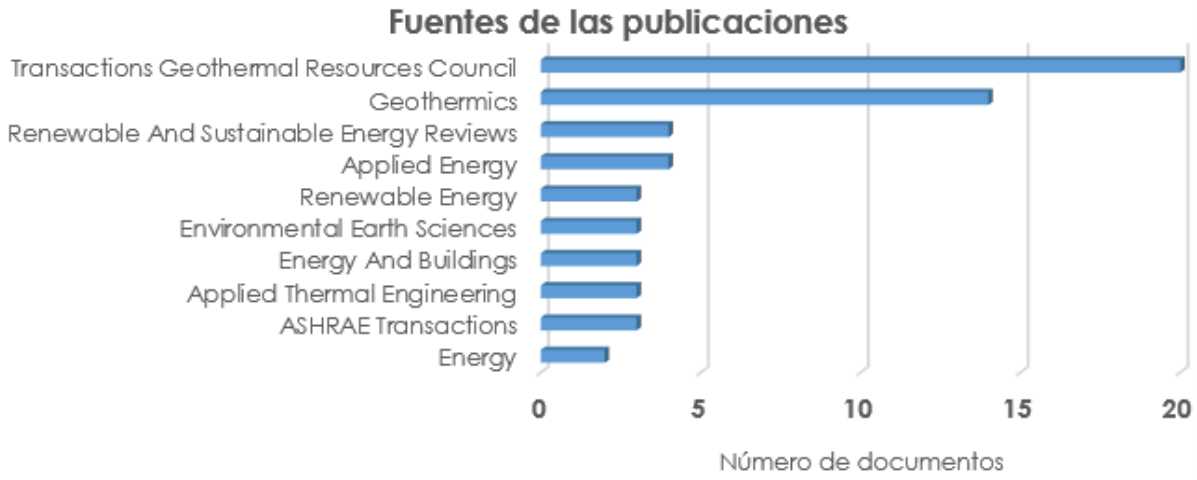


Figura 25. Fuentes con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de calentamiento

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

La revista *Transactions Geothermal Resources Council* registra el mayor número de publicaciones (20) seguida por *Geothermics* (14). Las revistas *Applied Energy y Renewable And Sustainable Energy Reviews les preceden con 4 cada una.* El resto de las fuentes reporta menos de 3 publicaciones.

La Figura 26 sugiere a los autores más activos en el tema. Lund J. W. es el autor que tiene mayor número de publicaciones (8), seguido de Boyd, T.L. y Omer, A.M. con 4 publicaciones cada uno. Los autores restantes poseen menos de 3 publicaciones.

Figura 26. Autores con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de calentamiento

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

La Figura 27 presenta las 10 instituciones más importantes con base en el número de publicaciones registrado en los últimos 15 años.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Figura 27. Organizaciones con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de calentamiento

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

El Instituto de Tecnología de Oregón en Estados Unidos ocupa la primera posición con 8 publicaciones seguida del Instituto de Investigación en Energía ERI con 4 publicaciones. La Universidad de Chile, el Instituto Federal de Tecnología de Zurich y la organización ENEL cuentan con 3 publicaciones. Las demás organizaciones han publicado menos de dos documentos.

La Figura 28 indica que de las 114 publicaciones registradas en el periodo 2003-2018, el 62% (71) corresponden a artículos científicos. El segundo tipo de publicación son documentos de conferencias con 43 registros.

Figura 28. Tipo de publicaciones relacionadas con el tema de calentamiento

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

En la Figura 29 se presentan los países con mayor número de publicaciones en los últimos 10 años. Estados Unidos, China y Turquía encabezan la lista con 24, 11 y 9 publicaciones, respectivamente. Con menor número de publicaciones les siguen Alemania con 8 y Reino Unido con 7. Holanda, Italia y Japón cuentan con 5 publicaciones.

Figura 29. Países con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de calentamiento

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

Bombas de calor

La tecnología utilizada en los sistemas de bombas de calor es madura y en los últimos años se ha expandido su utilización en diversos países: Esta situación se refleja en el incremento del número de publicaciones como se muestra en la Figura 30.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Figura 30. Progreso anual de publicaciones sobre el tema de bombas de calor geotérmico (groud source heat pumps)

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

En el periodo de años analizados, se observa que del 2000 al 2005 la divulgación relacionada con las bombas de calor geotérmico se mantuvo por debajo de las cincuenta publicaciones por año. A partir del 2006, en el que se contaba con alrededor de sesenta publicaciones, se inicia un crecimiento significativo, el cual llega a su punto máximo en 2014 cuando se reportan 321 publicaciones. En años posteriores se observa una ligera tendencia a la baja.

La Figura 31 muestra las 10 fuentes que publicaron más documentos relacionados con las bombas de calor geotérmico de 2000 a 2018.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

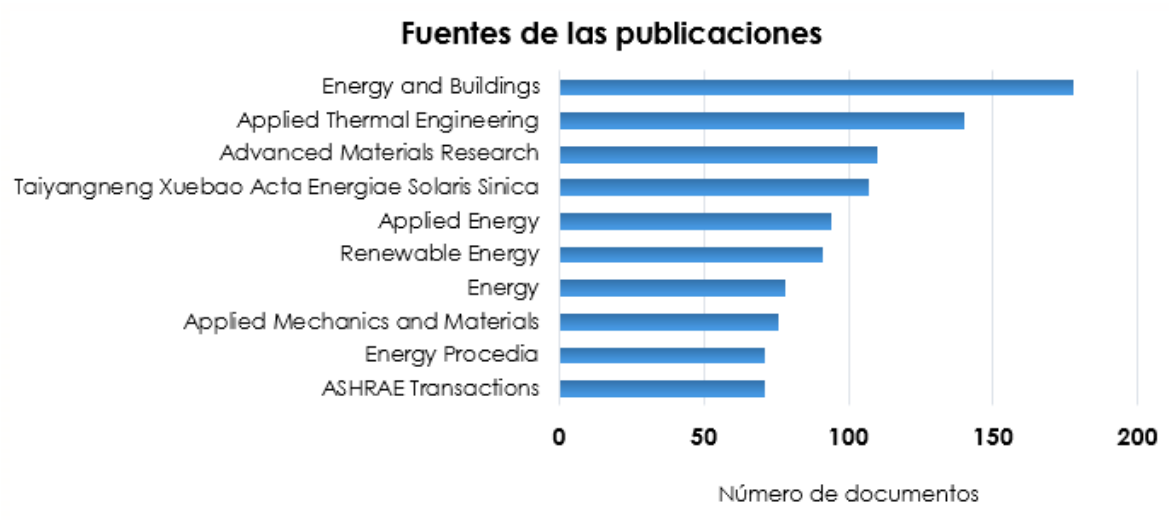


Figura 31. Fuentes con mayor número de documentos publicados relacionados con el tema bombas de calor geotérmico (ground source heat pump)

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

En el periodo de análisis, la revista que publica más documentos es *Energy and Buildings* con 178 publicaciones, seguida por *Applied Thermal Engineering* (140) y *Advanced Materials Research* (110). Los registros siguientes pertenecen a *Taiyangneng Xuebao Acta Energiae Solaris Sinica* (107), *Applied Energy* (94), *Renewable Energy* (91), *Energy* (78). Finalmente, las últimas tres fuentes son *Applied Mechanics and Materials* con 76 documentos y *Enegy Procedia* y *ASHRAE Transactions,* estas últimas con 71 publicaciones cada una.

En la Figura 32 se presentan los diez autores con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de bombas de calor geotérmico.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Figura 32. Autores con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de bombas de calor geotérmico (ground source heat pump)

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

Los autores Spitler, JD. y Fang, Z se localizan en la primera posición de la lista con 35 publicaciones cada uno, seguidos de Hepbasli, A. con 30 publicaciones y Zarrella, A. con 27. Los siguientes registros corresponden a Gao, Q. (26), De Carli, M.(25), Blum, P. (22), Hu, P.(21), Nagano, K.(20), y Cui. P. (19).

La Figura 33 muestra las diez organizaciones con mayor número de publicaciones relacionadas con las bombas de calor geotérmicos.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

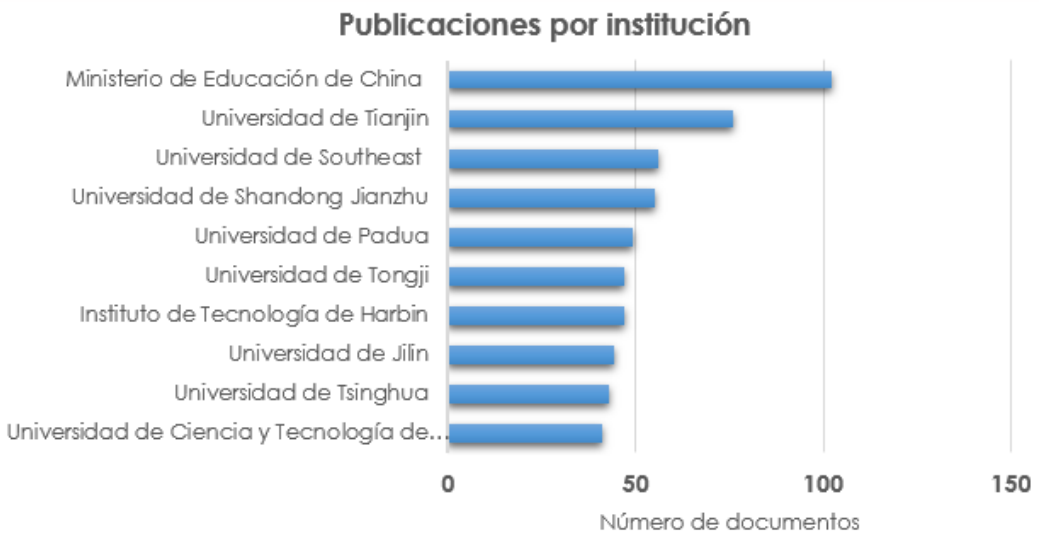


Figura 33. Organizaciones con mayor número de publicaciones del tema bombas de calor geotérmico (ground source heat pump)

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el Ministerio de Educación de China ocupa la primera posición con 102 publicaciones seguida por la Universidad de Tianjin (China) con 76 publicaciones y la Universidad de Southeast (China) con 56. Los siguientes registros corresponden a la Universidad de Shandong Jianzhu (55), la Universidad de Padua (Italia, 49), la Universidad de Tongji (47), el Instituto de Tecnología de Harbin (47), la Universidad de Jilin (44), la Universidad de Tsinghua (43) y la Universidad de Ciencia y Tecnología de Huazhong con 41 publicaciones.

El análisis muestra que las instituciones son congruentes con los datos obtenidos por país, puesto que la mayoría de las instituciones nombradas se localizan en China.

El último parámetro analizado se refiere al tipo de documento publicado relacionado con el tema de las bombas de calor geotérmico. En la Figura siguiente se muestran los resultados.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

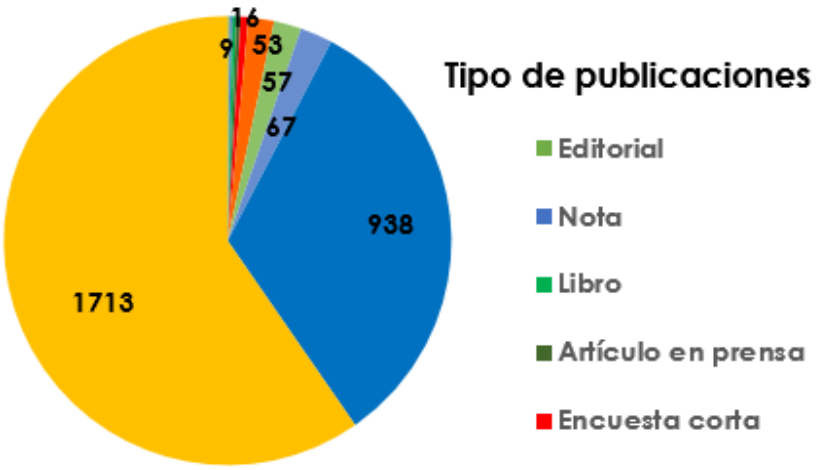


Figura 34. Publicaciones relacionadas con el tema de bombas de calor clasificadas por tipo de documento

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

Como se puede apreciar, los artículos especializados (1713) y los artículos de conferencia (938) son las categorías con mayor número, seguidas de los artículos de revisión con 67 registros. Las siguientes categorías corresponden capítulos de libros (57), Revisión de conferencias (53), encuesta corta (16), artículos de prensa (9), libros (8) y finalmente editorial y notas con 5 registros cada una.

En la Figura 35 se presentan los diez países con mayor número de publicaciones en el tema de bombas de calor geotérmico (*ground source heat pumps*).

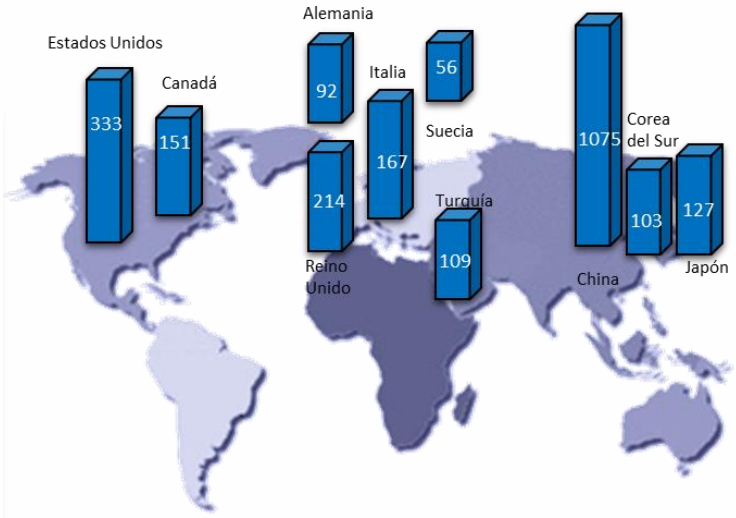


Figura 35. Países con mayor número de publicaciones relacionadas con las bombas de calor geotérmico (ground souce heat pumps)

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Como se puede apreciar, China lidera la lista con 1075 publicaciones, seguido de Estados Unidos (333), y el Reino Unidos en tercer lugar con 2014 publicaciones. Los siguientes registros corresponden a Italia (167), Canadá, Japón (127), Turquía (109), Corea de Sur (103), Alemania (92) y Suecia (52).

Nacional

La Figura 36 muestra el progreso en las publicaciones en México en el periodo 2001-2018. Durante el periodo indicado se publicaron 46 documentos, observándose cuatro comportamientos abruptos, con picos de aumento en las publicaciones; el primero en 2003, el segundo en 2006, el tercero en 2013 y el cuarto en 2016; siendo los de 2003 y 2016 los más altos con un máximo número de publicaciones de 6 unidades. Al primer semestre del 2018 se identificó tan sólo 1 publicación, lo que representa un 33% con respecto al año anterior. Por lo tanto, se espera que la cantidad de publicaciones se mantenga o continúe en aumento.

Figura 36. Progreso anual nacional sobre las publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

En la Figura 37 se presentan a nivel nacional las 10 principales fuentes de publicación.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Figura 37. Fuentes con mayor número a nivel nacional de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

La revista *Transactions Geothermal Resources Council* registra el mayor número de publicaciones (11) seguida por *Geothermia* (9). Las revistas *Journal Of Volcanology* And *Geothermal Research, Geothermics y Chemical Geology les preceden con 5, 3 y 2 publicaciones cada una respectivamente*. El resto de las fuentes reporta solamente 1 publicación.

La Figura 38 sugiere a los autores nacionales más activos en el tema.

Figura 38. Autores nacionales con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Iglesias, E. R. y Torres, R. J. son los autores que tienen mayor número de publicaciones (6 cada uno), seguido de Barragán Reyes, R. M. con 4 publicaciones. Los autores restantes poseen 3 y 2 publicaciones. Es importante mencionar que por lo que respecta específicamente al tema de bombas de calor geotérmicas, en México solo se tienen 3 publicaciones, 1 por cada autor.

La Figura 39 presenta las 4 instituciones más importantes con base en el número de publicaciones nacionales registrado en los últimos 11 años (2007-2018).

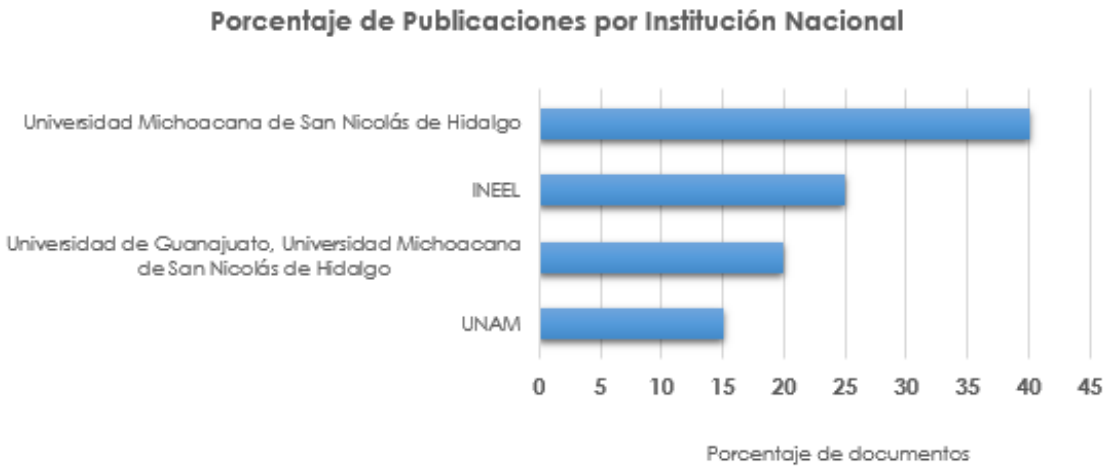


Figura 39. Organizaciones con mayor porcentaje en número de publicaciones relacionadas con el tema de usos directos de calor

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

La Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo ocupa la primera posición con 40% de las publicaciones seguida del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) con 25% de las publicaciones. La Universidad de Guanajuato en conjunto con la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo cuentan con el 20% de publicaciones y la Universidad Nacional de México (UNAM) ha publicado el 15%.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

La Figura 40 indica que de las 46 publicaciones registradas en el periodo 2001-2018.

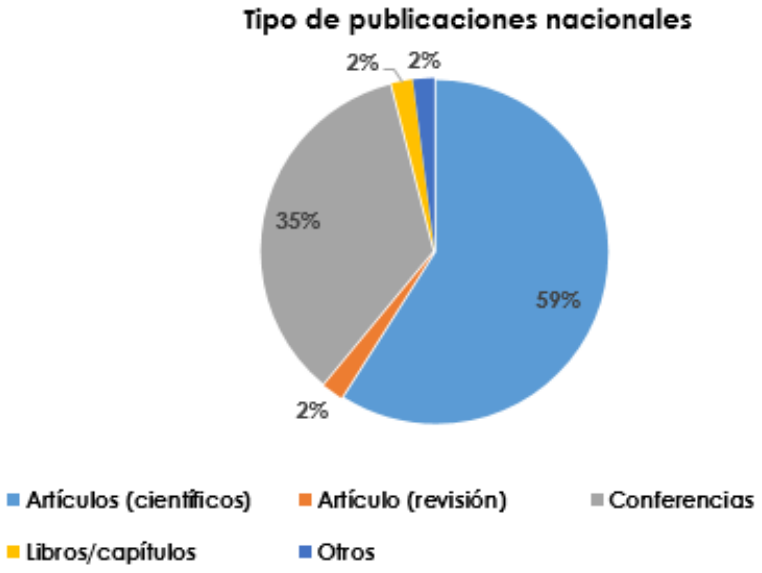


Figura 40. Tipo de publicaciones nacionales relacionadas con el tema de usos directos de calor

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

El 59% (27) de las publicaciones corresponden a artículos científicos. El segundo tipo de publicación son documentos de conferencias con 16 registros que constituyen el 35%. Los artículos en revisión, capítulos de libros y notas temáticas entre otros conforman el 6% restante (con 1 registro cada una).

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Análisis de patentes

En el ejercicio realizado sobre identificación de patentes sobre el tema de usos directos de calor geotérmico, se identificaron un total de 497 patentes publicadas desde 1999 a la fecha. Los años de publicación de patentes se presentan en la Figura 41.

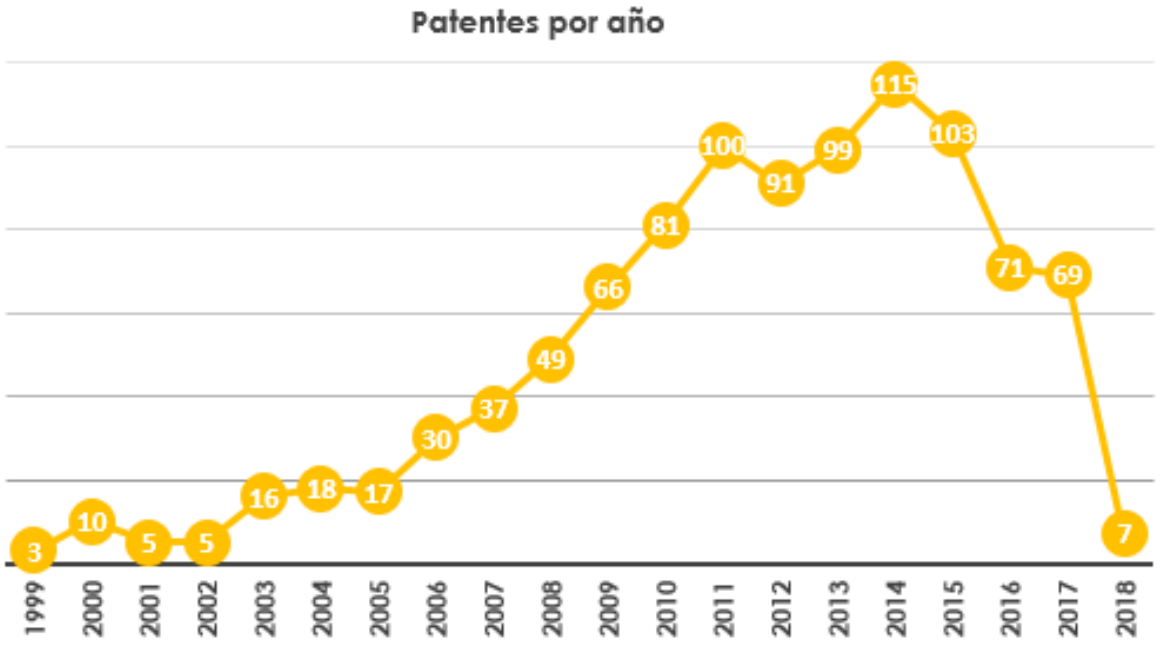


Figura 41. Progreso anual de las patentes publicadas sobre usos directos de calor geotérmico

Fuente: Estudio bibliométrico, Julio 2018.

De acuerdo al comportamiento de las publicaciones, se observa una tendencia a la alza hasta el año 2014, posteriormente el número de publicaciones de patentes disminuye hasta en un 40% para 2017. A 2018 se han publicado solamente 7 patentes.

La Figura 42 muestra las organizaciones con el mayor número de patentes asignadas.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

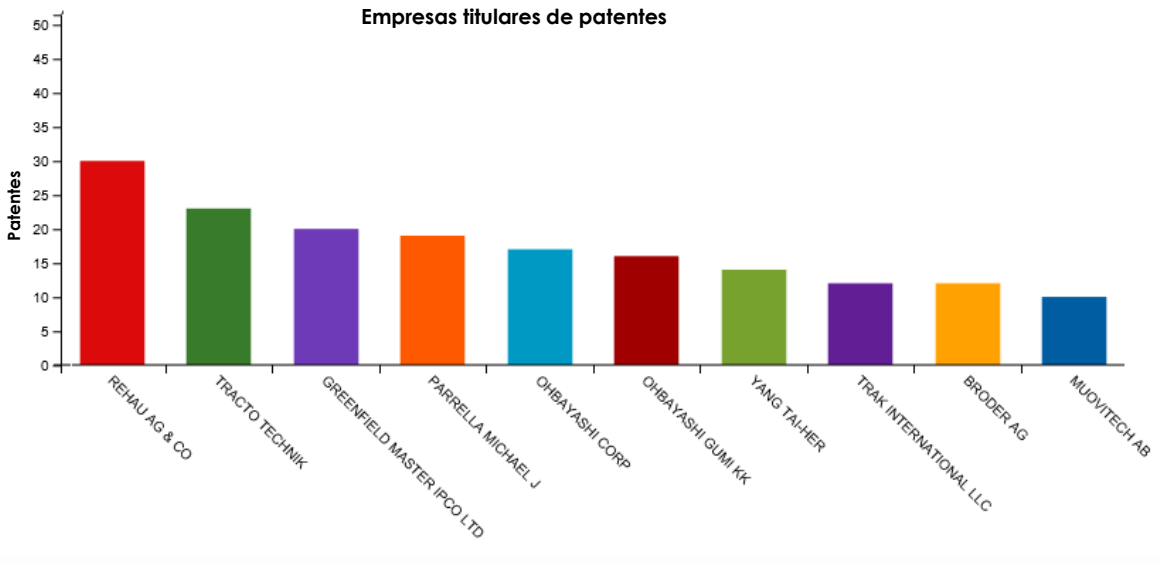


Figura 42. Principales organizaciones con patentes

Fuente: Derwent, Junio 2018

Rehau AG & Co posee el mayor número de patentes (29) seguida por Tracto Technik (24) y Greenfiel Master Ipco Ltd con 21 patentes.

Los países con mayor publicación de patentes se muestran en la figura siguiente:

Figura 43. Países con mayor número de patentes publicadas sobre usos directos de calor geotérmico

Fuente: Derwent, Junio 2018.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

La mayoría de las patentes están protegidas en varios países, ya sea ante las oficinas nacionales o como patentes tipo europea y mundial.

Los temas más sobresalientes asociadas a las patentes publicadas son dispositivos y diseños para bombas de calor, sistemas de calentamiento y enfriamiento para diferentes aplicaciones, así como materiales para recubrimiento y construcción de equipos.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Anexo 2. Capacidad instalada y consumo máximo de energía geotérmica a través de usos directos en México por localidad

Localidad	Tipo[1]	Consumo máximo			Capacidad[3] (MWt)	Consumo máximo		
		Rango flujo	Temperatura (°C)			Flujo promedio (kg/s)	Energía[4] (TJ/año)	Factor de capacidad
			Entrada	Salida				
Los Azufres, Mich.	A	0.100	77.0	60.0	0.007	0.030	0.067	0.300
Los Azufres, Mich.	B	38.000	72.0	55.0	2.703	34.960	78.391	0.920
Los Azufres, Mich.	G	0.050	60.0	40.0	0.004	0.011	0.028	0.210
Los Azufres, Mich.	H	4.583	110.0	86.0	0.460	1.389	4.397	0.303
La Primavera, Jal	B	63.000	48.0	31.0	4.481	58.650	131.511	0.931
Aguascalientes*	B	265.000	43.0	30.0	14.414	194.139	332.89	0.732
Chiapas*	B	1000.000	36.0	29.0	29.288	847.656	782.64	0.847
Chihuahua*	B	38.000	39.3	25.0	2.274	29.680	55.982	0.781
Coahuila*	B	56.000	32.0	25.0	1.640	33.390	30.829	0.596
Durango*	B	34.000	52.5	38.0	2.630	15.975	30.553	0.470
Guanajuato*	B	293.000	40.8	29.0	14.466	254.232	395.692	0.867
Hidalgo*	B	271.000	41.5	32.0	10.772	250.800	314.265	0.925
Jalisco*	B	368.000	37.8	30.0	12.010	316.350	325.467	0.859
México*	B	103.000	35.1	25.0	4.353	95.424	127.123	0.926
Michoacán*	B	161.000	44.5	33.0	7.747	152.785	231.752	0.949
Morelos*	B	95.000	45.0	30.0	5.962	74.580	147.557	0.785
Nuevo León*	B	295.000	38.0	30.0	9.874	250.700	264.539	0.850
Querétaro*	B	770.000	31.8	26.5	17.075	697.174	487.373	0.905

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Localidad	Tipo[1]	Consumo máximo				Consumo máximo		
		Rango flujo	Temperatura (°C)		Capacidad[3] (MWt)			
			Entrada	Salida		Flujo promedio (kg/s)	Energía[4] (TJ/año)	Factor de capacidad
San Luis Potosí*	B	292.000	36.8	31.0	7.086	233.888	178.929	0.801
Sinaloa*	B	7.000	72.5	61.0	0.337	4.601	6.979	0.657
Tlaxcala*	B	10.000	35.0	28.0	0.293	8.308	7.671	0.831
Veracruz*	B	42.000	65.0	48.0	2.987	39.328	88.185	0.936
Zacatecas*	B	163.000	36.6	28.5	5.524	138.700	148.186	0.851
TOTAL		**4368.733**	**47.1**	**35.5**	**155.819**	**3,732.75**	**4,171.00**	**0.849**

[3] Incluye balneología.

Fuente: (Gutiérrez-Negrín, Maya-González, & Quijano-León, 2015).

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

REFERENCIAS

Bloomquist, G. (2003). Geothermal Space Heating. *Geothermics*, 513-526. doi:10.1016/j.geothermics.2003.06.001

CanGEA. (2014). *Direct Utilization of Geothermal Energy: Suitable Applications and Opportunities for Canada.* Calgary: CanGEA.

CEMIE-Geo: Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica. (2013). *Plan Estratégico 2013-2021. CEMIE-Geo, Presentado en la Convocatoria del Fondo Sectorial de Sustentabilidad Energética CONACYT-SENER, Institución Responsable: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).*

Chatenay, C., & Jóhannesson, T. (2014). Cost and Revenues of Direct Use Applications. *Short Course VI on Utilization of Low- and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial*.

CONACYT. (2014, 05). *Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía.* Retrieved 06 2016, from Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética: http://www.conacyt.mx/index.php/el-conacyt/convocatorias-y-resultados-conacyt/convocatorias-fondos-sectoriales-constituidos/convocatoria-sener-conacyt-sustentabilidad-energetica/convocatorias-cerradas-sener-conacyt-sustentabilidad-energetica/2014-05-1/973

Daim, T. U., Rueda, G., Martin, H., & Gerdsri, P. (2006). Forecasting emerging technologies: Use of bibliometrics and patent analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 981-1012. doi:10.1016/j.techfore.2006.04.004

Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal Energy: Innovation and Technology.* UNESCO.

Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal Energy. Utilization and Technology.* UNESCO Publishing.

DOE-US. (2004). *Geothermal technologies program - Direct Use.*

DOF. (2014, Agosto 11). Ley de Energía Geotérmica. México.

Elsevier. (2016). *Scopus.* Retrieved 07 2016, from Features: https://www.elsevier.com/solutions/scopus

European Technology Platform. (2013). Implementation Roadmaps: Geothermal Technology. Dublin.

Fridleifsson, G., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J., Ragnarsonn, A., & Rybach, L. (2008). IPCC The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. In *Scoping Meeting on Renewable Energy Sources, Proceedings.* Lübeck, Germany: IPCC.

GEOTech. (2016). *Geothermal Technology for Economic Cooling and Heating.*

Gutiérrez-Negrín, L. C., Maya-González, R., & Quijano-León, J. L. (2015). Present situation and perspectives of Geothermal in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress 2015.* Melbourne, Australia.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Hiriat, G. (2011). Evaluación de la Energía Geotérmica en México. Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía.

Hochstein, M. (1990). Classification and Assessment of Geothermal Resources. In M. Dickson, & M. Fanelli, *Small Geotherma Resources: A guide to Development and Utilization* (pp. 31-59). Rome : UNITAR/UNDP Centre on small Energy Resources .

IEA. (2011). *Technology Roadmap Geothermal Heat and Power.* International Energy Administration.

Jeenejohn, D. (2009). *State and Federal Incentives for Small Power and Direct-Use Geothermal Production.* Geothermal Energy Association.

Johannesson, T., & Chatenay, C. (2014). Cost and Revenues of Direct use Aplications. *hort Course VI on Utilization of Low- and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects Utilization.* San Salvador.

Jóhannesson, T., & Chatenay, C. (2014a). Direct Use of Geothermal Resources. *Short Course VI on Utilization of Low- and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects Utilization.* El Salvador.

Jóhannesson, T., & Chatenay, C. (2014b). Industrial Applications Of Geothermal Resources. *Short Course VI on Utilization of Low and Medium Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization, organized by UNU- GTP*.

Lee, K. C. (1996). Classification of Geothermal Resources. An Engineering Approach. *Twenty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.* Standford, California: Standford University.

Lindal, B. (1992). Review of industrial applications of geothermal energy and future considerations. *Geothermics*, 591-604.

Lund, J. (1996). Balneology Use of Thermal Waters . *Geothermics*, 103-147.

Lund, J. (2009). Development of Direct-Use Projects. *International Geothermal Days Slovakia 2009- Conference & Summer School*.

Lund, J. (2010). Development of Direct-Use Projects. *GHC Bulletin*.

Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2015). Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worlwide Review. *World Geothermal Congress 2015.* Melbourne, Australia.

Nguyen , M., Araso, S., Gissurarson, M., & Pálsson, P. (2015). *Uses of geothermal energy in food and agriculture. Oportunities for developing contries.* Rome: FAO.

Popovski, K. (2009). Agricultural and industrial uses of geothermal energy in Europe. *Proceedings of the International Geothermal Days Slovakia 2009 – Conference and Summer School*.

Rangel, M. E. (1998). Mushroom Growing Project at the Los Humeros, Mexico Geothermal Field. *GHC Bulletin*.

Sánchez, E., & Casimiro, E. (1995). Direct Use of the Geothermal Energy at Los Azufres Geothermal Field, Mexico. *Geothermal Resources Council TRANSACTIONS, 19*, 413-415.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Sander, M. (Abril 2015). Regulatory Framework Conditions for Geothermal Direct Use Projects in France, Germany, Iceland, Sweden and Turkey. *Proceedings World Geothermal Congress 2015.* Melbourne Australia.

Santoyo, E., & Barragán, R. M. (2010). Energía Geotérmica. *Ciencia*.

Santoyo, E., & Torres , I. (2010). Escenario Futuro de explotación de la energía geotérmica: Hacia un desarrollo sustentable. *Revista Digital Universitaria*.

Santoyo-Gutierrez, E., & Torres-Alvarado, I. S. (Octubre 2010). Escenario futura de la explotación de la energía geotérmica: Hacua un desarrollo sustentable. *Revista Digital Universitaria*.

SENER. (2015). *Inventario Nacional de Energías Limpias*. Recuperado el 02 de Mayo de 2018, de https://dgel.energia.gob.mx/qa/INEL/INELV5/

SENER. (2017). Mapa de Ruta Tecnológica en Geotermia. *SENER*. Ciudad de México.

SENER. (2017b). Oportunidades en geotermia, baja y mediana entalpía. Presentación realizada durante el taller Usos directos de la Energía Geotérmica.

Tester, J., Blackwell, D., Petty, S., Richards, M., More, M., Anderson, B., . . . Garnish, J. (2007). The future of Geothermal Energy: An assessment of the energy suply potential of engineered geothermal systems (LEGS) for the United States. *Thirty second Workshop of Geothermal Reservooir Engineering.* Stanford University, California.

Thomson Reuters. (2008). *Using Bibliometrics.* Retrieved 07 2016, from A guide to evaluating research performance with citation data: http://ip-science.thomsonreuters.com/m/pdfs/325133_thomson.pdf

Williams, C. F., & Anderson, M. J. (2011). Updating the Classification of Geothermal Resources. *Thirty-Sixth Worshop on Geothermal Reservoir Engineering* . Stanford, California: Standford University.

Copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO

SENER
SECRETARÍA DE ENERGÍA

FONDO
DE SUSTENTABILIDAD
ENERGÉTICA

***Copyright* © Instituto Mexicano del Petróleo**
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.