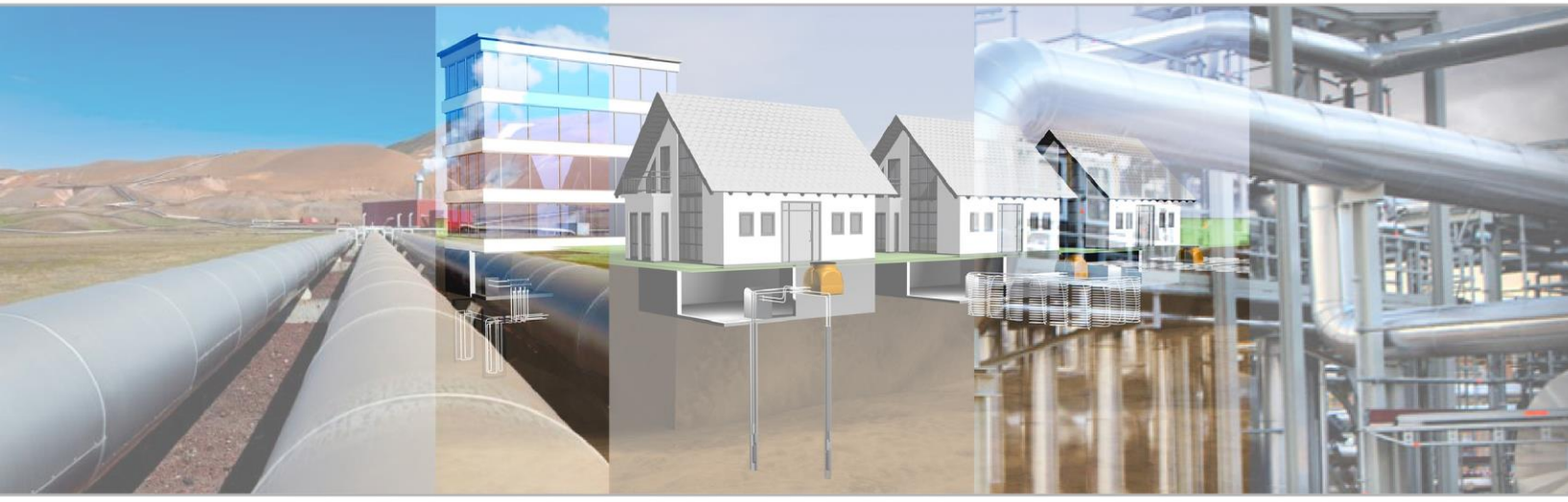
SENER
SECRETARÍA DE ENERGÍA

Mapa de Ruta Tecnológica

Usos Directos del Calor Geotérmico



2018

Secretaría de Energía

Pedro Joaquín Coldwell
Secretario de Energía

Leonardo Beltrán Rodríguez
Subsecretario de Planeación y Transición Energética

Fernando Zendejas Reyes
Subsecretario de Electricidad

Aldo Flores Quiroga
Subsecretario de Hidrocarburos

Gloria Brasdefer Hernández
Oficial Mayor

Edgar Santoyo Castelazo
Director General de Investigación, Desarrollo Tecnológico y Formación de Recursos Humanos

Fernando Torres Calva
Director de Innovación Tecnológica

Revisión y Aprobación

Secretaría de Energía

Edgar Santoyo Castelazo
Director General de Investigación, Desarrollo Tecnológico y Formación de Recursos Humanos

Ernesto Gabriel Hernández Montoya
Secretario Administrativo del Fondo Sectorial CONACYT-SENER Sustentabilidad Energética

Fernando Torres Calva
Director de Innovación Tecnológica

Michelle Alejandra Ramírez Bueno
Directora de Geotermia

David A. Rocha Ruiz
Coordinador Técnico de Geotermia

Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica
(CEMIE-Geo)

José Manuel Romo Jones
Responsable Técnico del CEMIE-Geo

Héctor Miguel Aviña Jiménez
Coordinador del Grupo iiDEA, Instituto de Ingeniería, UNAM

Elaboración

En colaboración con el Instituto Mexicano del Petróleo

Ernesto Ríos Patrón
Director General

Rafael Ramos Palmeros
Director de Desarrollo de Talento

María Georgina Ortiz Gallardo
Jefa de Proyecto

Guadalupe Haydé Moreno Vásquez
Especialista

Gabriela Matzallani Gómez Alvarado
Especialista

César Andrés de la Fuente Melo
Especialista

Claudia Rivera Villa
Especialista

Martha Beatriz Rodríguez Hidalgo
Especialista

Carlos Vega Reyes
Especialista

Martha Elena Padilla Reyes
Especialista

Sebastián Madrigal Olan
Especialista

ÍNDICE

Agradecimientos 10
Introducción 11
Metodología general para la integración del mapa de ruta tecnológica 13
Generalidades de los usos del calor geotérmico 16
Visión al 2030 35
I. Aplicaciones en cascada 36
II. Otras aplicaciones 38
III. Bombas de calor geotérmico 38
Implementación de la visión 40
I. Acciones estratégicas para fortalecer el desarrollo de la industria: Retos tecnológicos 40
I.a. Aplicaciones de usos directos del calor geotérmico 41
I.b. Bombas de calor geotérmico 49
II. Acciones habilitadoras para el desarrollo del mercado de usos directos del calor geotérmico 53
II.a. Ámbito Regulatorio 54
II.b. Ámbito Económico 56
II.c. Recursos Humanos 63
II.d. Ámbito Social 65
II.e. Ámbito Ambiental 67
Diagrama 69
Conclusiones y acciones siguientes 70
Referencias 72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas generales para la integración del Mapa de Ruta Tecnológica de Usos Directos del Calor Geotérmico 13
Figura 2. Esquema general de una BCG 18
Figura 3. Ejemplo de sistema cascada que combina calor y electricidad 21
Figura 4. Actividades típicas en la implementación de un proyecto geotérmico 22
Figura 5. Crecimiento de la capacidad instalada y aprovechamiento de energía geotérmica a través de Usos directos del calor geotérmico (1995-2015) 24
Figura 6. Capacidad instalada de las diferentes aplicaciones de UDCG (1995-2015) 25
Figura 7. Uso anual de energía en aplicaciones de UDCG (1995-2015) 25
Figura 8. Distribución de la capacidad instalada de las diferentes aplicaciones de usos directos del calor geotérmico, 2015 26
Figura 9. Distribución del uso de las diferentes aplicaciones de UDCG durante 2015 26
Figura 10. Visión para el desarrollo de los usos directos del calor geotérmico al año 2030 36

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1 Balneario geotérmico en Húsavík, Islandia 15
Imagen 2 Acuacultura 17
Imagen 3 Acondicionamiento de invernaderos 18
Imagen 4 Pruebas en campo del ciclo de generación IDEA 10 19
Imagen 5 Acondicionamiento de edificios 20
Imagen 6 Instalación de equipos en sitio 22
Imagen 7 Equipos operando en el campo San Pedro Lagunillas, Nayarit 23
Imagen 8 Desaladora modular geotérmica, Prototipo de 3 m^3 día 38
Imagen 9 Tuberías de un sistema de usos directos 39
Imagen 10 Producto deshidratado 46
Imagen 11 Instalación comercial de usos directos del calor 52
Imagen 12 Pruebas de deshidratación en campo 62
Imagen 13 Preparación del alimento a deshidratar 67
Imagen 14 Trabajos de instalación de equipo en el campo San Pedro Lagunillas, Nayarit 68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los recursos geotérmicos 17
Tabla 2. Aspectos a considerar en la estimación de costos de los proyectos de UDCG 27
Tabla 3. Capacidad instalada a nivel nacional de usos directos del calor geotérmico, 2013 29
Tabla 4. Proyectos correspondientes a aplicaciones en cascada 30
Tabla 5. Proyectos correspondientes a otras aplicaciones 31
Tabla 6. Proyectos correspondientes a bombas de calor geotérmico 32
Tabla 7. Proyectos del CEMIE-Geo relacionados con los usos directos del calor geotérmico 34
Tabla 8. Acciones estratégicas prioritarias para alcanzar la visión al año 2030 41
Tabla 9. Acciones estratégicas prioritarias para las aplicaciones de usos directos del calor geotérmico 41
Tabla 10. Actividades prioritarias sugeridas para complementar los sistemas de información de energías limpias existentes 43
Tabla 11. Actividades prioritarias sugeridas para identificar sitios potenciales donde confluye el recurso geotérmico con procesos industriales que involucren calor 45
Tabla 12. Actividades prioritarias sugeridas para mejorar la rentabilidad de los proyectos de usos directos del calor geotérmico 47
Tabla 13. Actividades prioritarias sugeridas para garantizar la calidad en la implementación de las instalaciones de UDCG 48
Tabla 14. Acciones estratégicas prioritarias para bombas de calor geotérmico 49
Tabla 15. Actividades prioritarias sugeridas para desarrollar alternativas tecnológicas para disminuir costos asociados a proyectos de bombas de calor geotérmico 50
Tabla 16. Actividades prioritarias sugeridas para garantizar el desempeño y la calidad de los sistemas de bombas de calor geotérmico 51
Tabla 17. Barreras para el desarrollo de los usos directos deL calor geotermico y acciones habilitadoras sugeridas para mitigarlas 53
Tabla 18. Actividades prioritarias para difundir el marco regulatorio para el aprovechamiento de los UDCG 56
Tabla 19. Actividades prioritarias sugeridas para fomentar el desarrollo del mercado de UDCG mediante proyectos demostrativos con nuevos esquemas de negocio 57
Tabla 20. Actividades prioritarias sugeridas para Identificar y fortalecer la infraestructura de soporte para los usos directos del calor geotérmico 60
Tabla 21. Actividades prioritarias sugeridas para habilitar la cadena de suministro para el desarrollo de proyectos de usos directos del calor geotérmico 61
Tabla 22. Actividades prioritarias sugeridas para incrementar los recursos humanos especializados para los proyectos de UDCG 63
Tabla 23. Acciones prioritarias sugeridas para implementar estrategias de comunicación y difusión de las tecnologías de aprovechamiento de los UDCG 66
Tabla 24. Acciones prioritarias sugeridas para el control volumétrico del fluido geotérmico en función de su composición química y su disposición en el subsuelo 68

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AGM	*Asociación Geotérmica Mexicana*
AZEL	*Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias*
BCG	*Bomba de Calor Geotérmico*
CANACO	*Cámara Nacional de Comercio*
CEMIE-Geo	*Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica*
CFE	*Comisión Federal de Electricidad*
CGCEREE	*Comité de Gestión por Competencia de Energías Renovables y Eficiencia Energética*
CoIDT+i	*Comunidad de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación*
CONACYT	*Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*
CONAGUA	*Comisión Nacional del Agua*
CONOCER	*Consejo Nacional de Normalización y Certificación de Competencias Laborales*
CONUEE	*Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía*
EC	*Estándar de Competencia*
EMA	*Entidad Mexicana de Acreditación*
EVIS	*Evaluación de Impacto Social*
FIDE	*Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica*
GEI	*Gases de Efecto Invernadero*
IEA	*International Energy Agency (Agencia Internacional de Energía)*
IGA	*International Geothermal Association (Asociación Geotérmica Internacional)*
IMTA	*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*
INEL	*Inventario Nacional de Energías Limpias*

AGM	*Asociación Geotérmica Mexicana*
INEEL	*Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias*
LAN	*Ley de Aguas Nacionales*
LEG	*Ley de Energía Geotérmica*
MRT	*Mapa de Ruta Tecnológica*
PEFRHME	*Programa Estratégico de Formación de Recursos Humanos en Materia Energética*
PRESEMEH	*Proyecto de Eficiencia y Sustentabilidad Energética en Municipios Escuelas y Hospitales*
PRODETES	*Proyecto de Desarrollo de Tecnologías de Energía Sustentable para el Cambio Climático*
SAGARPA	*Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación*
SCT	*Secretaría de Comunicaciones y Transportes*
SE	*Secretaría de Economía*
SEMARNAT	*Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*
SENER	*Secretaría de Energía*
SEP	*Secretaría de Educación Pública*
SHCP	*Secretaría de Hacienda y Crédito Público*
UDCG	*Usos Directos del Calor Geotérmico*

Agradecimientos

El presente reporte se generó en el marco del proyecto "Desarrollo de los mapas de ruta tecnológicos para los Centros Mexicanos de Innovación en Energía" que el Instituto Mexicano del Petróleo realizó para el Fondo Sectorial de Sustentabilidad Energética CONACYT-SENER, a quien expresamos nuestro agradecimiento por hacer posible la realización de este trabajo.

Hacemos un reconocimiento a la Secretaría de Energía por su liderazgo, coordinación y por todo el apoyo brindado durante la realización del proyecto. Asimismo, expresamos un sincero agradecimiento a los siguientes especialistas por su participación y sus valiosas aportaciones en los talleres y el proceso de retroalimentación del presente reporte.

Lic. Michelle A. Ramírez Bueno	Secretaría de Energía
Ing. David A. Rocha Ruiz	Secretaría de Energía
Mtra. Gabriela Reyes Andrés	Secretaría de Energía
Lic. Daniel Vázquez Medina	Secretaría de Energía
Dr. José Manuel Romo Jones	CEMIE-Geo-CICESE
Ing. Luis Carlos Gutiérrez Negrín	CEMIE-Geo-Geocónsul
Dr. Héctor Miguel Aviña Jiménez	CEMIE-Geo-Grupo iiDEA
Mtra. Cristy Manzano Hoyos	CEMIE-Geo-Grupo iiDEA
Dr. Vicente Torres Luna	CEMIE-Geo-INEEL
Dr. Julio Vargas Medina	CEMIE-Geo-UMSNH
Dr. Carlos Rubio Maya	CEMIE-Geo-UMSNH
Dr. Crisanto Mendoza Covarrubias	CEMIE-Geo-UMSNH
Dr. Alfonso García Gutiérrez	CEMIE-Geo
Ing. Carlos Vera Mendoza	CEMIE-Geo
Ing. Noé Piedad Sánchez	CEMIE-Geo
Dr. Abelardo Mercado Herrera	CEMIE-Geo
Ing. Domingo A. Silva Gamboa	CONAGUA
Ing. Gabriela Ofelia Suárez García	CONAGUA
Biol. Emigdio Casimiro Mendoza	Comisión Federal de Electricidad (CFE)
Ing. Noel González Alcántar	Grupo Dragón
Ing. Benjamín Marín Fuentes	FIDE
Dra. Mariene Gutiérrez Neri	Tlalli Energía
Ing. Roberto Rodríguez Marian	ENAL
Ing. Edgar Cruz Ortiz	ENAL
Ing. Daniel González Orellana	PI Ingenera
Ing. Luis Enrique Mora Guerrero	Inversa
M. C. Inti Ramos Campos	IES
Ing. Raúl A. Sánchez Velasco	Sustentabilidad Energética Mexicana
Mtro. Guillermo Lagos Espinoza	Moonshot Fab
Mtro. Rafael Carmona Dávila	Green Momentum
Ing. Jonathan Escalante Solis	Green Momentum
Eduardo Sebastián González Espinosa	Green Momentum

Un especial agradecimiento para Thorleikur Jóhannesson de la empresa Verkís por sus valiosas aportaciones durante los talleres sobre el desarrollo de la industria de los usos directos del calor geotérmico en Islandia y en otras partes del mundo.

Introducción

Los recursos geotérmicos son una fuente de energía renovable y sustentable con la posibilidad de desempeñar un papel crucial en la diversificación de la matriz energética, contribuyendo a su descarbonización y permitiendo la competitividad en este sector a nivel nacional. La energía geotérmica presenta varias ventajas, entre ellas ser manejable, flexible y continua, a diferencia de otras energías renovables que son intermitentes a lo largo del día o del año.

Los usos directos del calor geotérmico (UDCG) son una forma de aprovechar los recursos energéticos del subsuelo, ya que pueden suministrar energía para diferentes aplicaciones que requieren demandas específicas de calor (baja o alta entalpía).

Los UDCG pueden ser utilizados en el sector residencial, de servicios y en la industria, a través de distintas aplicaciones que pueden operar en rangos de temperatura que van de los 20° a más de 180°C (Armstead, 1973). Algunas de las aplicaciones más desarrolladas a nivel mundial son la balneología (terapéutica y recreativa), la climatización de espacios, diversos usos industriales como secado y deshidratación.

México cuenta con un gran potencial de recursos geotérmicos que pueden ser explotados a través de los UDCG; no obstante, se encuentran en un estado de desarrollo incipiente y reducidos prácticamente a los balnearios. En la década de 1980 la CFE promovió varias iniciativas y proyectos demostrativos para aprovechar la energía geotérmica en distintas aplicaciones de UDCG, principalmente en los campos geotérmicos de Los Azufres en Michoacán y Los Humeros en Puebla; sin embargo, fueron abandonados eventualmente.

Como un subproducto de la Reforma Energética, se reconocen diferentes elementos impulsores para incrementar el aprovechamiento de la energía geotérmica a través de los usos directos del calor. Entre ellos se encuentra la Ley de Transición Energética que regula el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de energías limpias y emisiones de GEI. También son elementos impulsores de la geotermia, los compromisos individuales que México estableció a nivel internacional para la reducción de emisiones de GEI, y aquellos que se asumieron cuando México entró a formar parte de la *Global Geothermal Alliance*[1], ambos durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático en 2015.

En cuanto al marco regulatorio para el aprovechamiento de recursos geotérmicos, en agosto de 2014 se aprobó la Ley de Energía Geotérmica (LEG) (DOF, 2014a), la cual tiene como objetivo regular las actividades de reconocimiento, exploración y explotación de los recursos geotérmicos en el país. Esta ley ha cubierto los aspectos legales más importantes de los proyectos geotérmicos para generación eléctrica, pero hasta la fecha se carece de una meta a nivel nacional para el aprovechamiento futuro de los usos directos de la energía geotérmica.

Reconociendo el potencial geotérmico de México, desde hace algunos años el Gobierno Federal, a través del Fondo de Sustentabilidad Energética (FSE), lleva a cabo diversas iniciativas encaminadas a fortalecer las capacidades científicas y tecnológicas del país para soportar el crecimiento de esta industria. Un ejemplo es la puesta en marcha en 2014 del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE-Geo) conformado por las principales instituciones y empresas del país enfocadas en el tema de geotermia. Este consorcio tiene como fin generar sinergias en favor del aprovechamiento de energía geotérmica de México e integrar una cartera de proyectos estratégicos cuyos resultados sean de valor para el sector. En la misma línea, el FSE patrocinó un ejercicio de planeación estratégica sin precedentes en el país, consistente en la elaboración de los mapas de ruta tecnológica, con una visión al año 2030, para diversos tipos de energías limpias.

En 2017, como producto de esa iniciativa, se publicó el Mapa de Ruta Tecnológica en Geotermia, 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. Pero, como se ha comentado, a diferencia de otros tipos de energías limpias, la energía geotérmica tiene aplicaciones directas cuya situación, problemática y perspectivas son diferentes de su uso para la generación de electricidad. Tomando esto en cuenta, se recomendó en el MRT de Geotermia la elaboración de un Mapa de Ruta Tecnológico en Usos Directos del Calor Geotérmico. De esta forma, ambos documentos ofrecen un panorama completo del sector geotérmico del país.

Con los resultados obtenidos de los mapas de ruta tecnológica, el FSE dispondrá de instrumentos de planeación realizados bajo una metodología homologada que le permitirá direccionar recursos a proyectos de investigación, desarrollo tecnológico e innovación, cuyos resultados impacten en el desarrollo de la industria de los UDCG en el país.

Propósito del mapa de ruta

[1] La Alianza Global en Geotermia (GGA, por sus siglas en inglés), que es una iniciativa promovida por la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), estableció como objetivos aspiracionales un aumento del 500 por ciento en la capacidad instalada mundial para la generación de energía geotérmica y un aumento del 200 por ciento en la calefacción geotérmica para 2030 (GGA, 2015).

Este mapa de ruta tiene como propósito identificar los retos técnicos y las barreras que enfrenta el país para lograr las metas sobre capacidad instalada de UDCG que se consideran factibles para el 2030, así como las acciones estratégicas y habilitadoras consideradas prioritarias para lograrlas. En particular, se busca que el mapa de ruta sea un insumo de información que sirva de base para orientar la definición de proyectos e iniciativas enfocadas a fortalecer, incrementar y/o generar las capacidades tecnológicas necesarias para dar soporte al desarrollo sustentable de la industria de UDCG en México, incluyendo infraestructura, recursos humanos especializados, y servicios tecnológicos, entre otros.

En este mapa de ruta se propone una visión al 2030 en la que se considera factible contar con una capacidad instalada de UDCG de 3,800 MWt.

Esta visión se estableció a partir de una serie de talleres realizados en abril y mayo de 2018, en los que participaron especialistas en temas de usos directos de calor geotérmico, provenientes de la comunidad de investigación y desarrollo tecnológico, el gobierno y la industria del país.

Para orientar la generación de la visión de este mapa de ruta, se consultaron diversos documentos, que se detallan en la sección correspondiente a fuentes de información, relacionados con aspectos técnicos tanto nacionales como internacionales y documentos del Gobierno Federal relacionados con el ámbito regulatorio.

El mapa de ruta presenta una serie de acciones estratégicas y habilitadoras que se consideran prioritarias para favorecer la incorporación oportuna de las capacidades tecnológicas necesarias para alcanzar la capacidad instalada establecida en la visión al 2030. También presenta un conjunto de actividades específicas propuestas para solventarlas, actores involucrados y plazos estimados para su ejecución. Cabe señalar que las acciones, actividades, actores y plazos propuestos no representan un programa de trabajo, sino una perspectiva global de las implicaciones y requerimientos para impulsar el aprovechamiento de los usos directos de calor geotérmico en México.

Es preciso mencionar que los resultados incluidos en este documento corresponden a las condiciones técnicas, políticas, económicas, legales y sociales prevalecientes en el contexto nacional al momento en que se desarrollaron los talleres. Por lo anterior, la vigencia, prioridad, actores y/o plazos indicados podrían modificarse en la medida en la que existan cambios significativos en el entorno en alguno de los ámbitos señalados.

Estructura y contenido del reporte

Este documento está conformado por cinco capítulos. En el primero de ellos se describe la metodología empleada para la generación de este mapa de ruta tecnológica y posteriormente se presenta un panorama general del estado de los usos directos de calor geotérmico en México. En el siguiente capítulo se describen los resultados del mapa de ruta, incluyendo la visión al 2030, las acciones estratégicas propuestas para implementarla y las acciones habilitadoras que se consideran prioritarias para fortalecer el mercado de usos directos de calor geotérmico. Finalmente, los dos capítulos subsecuentes, se enfocan en describir la estructura y contenido del diagrama del mapa de ruta, así como las conclusiones y siguientes acciones.

Metodología general para la integración del mapa de ruta tecnológica

El Mapa de Ruta Tecnológica (MRT) es una herramienta de soporte en los procesos de planeación estratégica. Mediante esta herramienta se busca comunicar las acciones clave a desarrollar por los diferentes actores dentro de una organización para incorporar oportunamente las capacidades tecnológicas necesarias para lograr sus objetivos en el largo plazo. Diversas organizaciones alrededor del mundo utilizan los mapas de ruta como parte de sus procesos de planeación para orientar la definición de sus programas de desarrollo tecnológico y proyectos de generación de nuevos productos.

Los mapas de ruta contribuyen con los procesos de planeación estratégica en dos sentidos. Por una parte, se genera una visión compartida entre los diferentes actores dentro de la organización que están involucrados en el cumplimiento de un objetivo particular. Por otra parte, se obtiene una representación gráfica que permite comunicar a todos los actores la serie de acciones que se deben llevar a cabo en el corto, mediano y largo plazo para alcanzar dicho objetivo. En el caso particular de los mapas de ruta tecnológica, las acciones se focalizan primordialmente en favorecer la adquisición y fortalecimiento de las capacidades tecnológicas necesarias para lograr un objetivo.

Existen diferentes metodologías para construir mapas de ruta tecnológica, que varían en la forma de cómo se define el estado y las tendencias de la industria, la identificación de los actores clave y en los métodos empleados para alcanzar consensos en la visión, enfoque, retos y barreras; asimismo, pueden variar en su estructura. La construcción de mapas de ruta se puede realizar a partir de alguno de los siguientes métodos: a) Método basado en la experiencia de expertos; b) Método de talleres basados en discusiones dirigidas y c) Método basado en trabajo de escritorio (Australian Government - Department of Industry, Tourism and Resources, 2001).

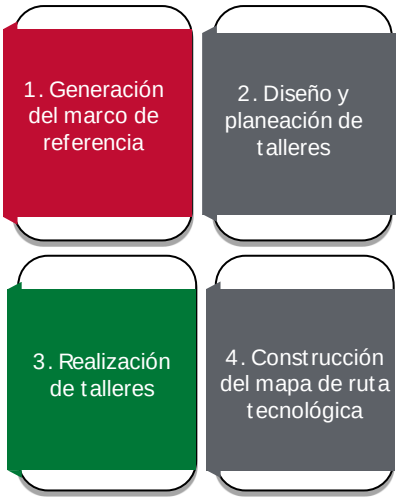
En el caso del mapa de ruta tecnológica de UDCG, su construcción siguió el método de talleres basados en discusiones dirigidas. La realización del mapa bajo este método implicó una serie de actividades que van desde el análisis de la situación actual del aprovechamiento de este recurso en el país, hasta la generación del reporte que describe con mayor nivel de detalle las acciones clave para alcanzar la visión establecida al 2030.

La metodología empleada para la generación de este mapa de ruta, combina las prácticas propuestas por la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2014; IEA & OECD, 2017), la Universidad de Cambridge (Phaal, 2001), con la experiencia adquirida por el Instituto Mexicano del Petróleo en la generación de mapas de ruta en el contexto del sector hidrocarburos (IMP, 2011; 2017).

La construcción del mapa de ruta tecnológica se realizó a través de un proceso de cuatro etapas (Figura 1):

1. Generación del marco de referencia
2. Diseño y planeación de talleres
3. Realización de talleres
4. Construcción del mapa

FIGURA 1. ETAPAS GENERALES PARA LA INTEGRACIÓN DEL MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA DE USOS DIRECTOS DEL CALOR GEOTÉRMICO



1. Generación del marco de referencia

La primera etapa involucró la generación de la información que sirvió de referencia para diseñar el mapa. En esta etapa se realizó una caracterización general de la industria, de las aplicaciones para UDCG, y del progreso científico y tecnológico alcanzado en los ámbitos nacional e internacional, en relación a la solución de retos técnicos existentes. Como resultado se generó un reporte que fue el insumo fundamental para la definición del enfoque y estructura del mapa de ruta. Este fue el Reporte de Inteligencia Tecnológica de Usos Directos del Calor Geotérmico (SENER-IMP, 2018a) en el que se documentan los retos técnicos y el estado general de desarrollo de las tecnologías clave en el aprovechamiento de este tipo de recursos y sus aplicaciones.

2. Diseño y planeación de talleres

En la segunda etapa, se definió el enfoque particular del mapa de ruta tecnológica, y se decidieron los participantes y la estructura de los talleres. A lo largo de esta etapa se realizaron entrevistas con diversos

especialistas del sector a fin de tener una mejor comprensión de la estructura de la industria y mayores elementos para diseñar los talleres. También se hizo un análisis del diagnóstico sobre las capacidades tecnológicas del CEMIE-Geo con el fin de conocer el estado y alcance de los proyectos relacionados en UDCG que se están realizando en este centro (SENER-IMP, 2016).

El enfoque y estructura del mapa se estableció a partir del nivel del desarrollo de la industria en México y de la madurez de las tecnologías clave. En esta etapa se identificaron, seleccionaron e invitaron a expertos e instituciones a participar en los talleres. Los asistentes fueron seleccionados por su conocimiento de los retos, barreras y posibles soluciones a los problemas existentes en México para el desarrollo del mercado de UDCG.

3. Realización de talleres

Los talleres se efectuaron durante los meses de abril y mayo de 2018, en las instalaciones del Instituto Mexicano del Petróleo en la Ciudad de México. Se contó con la participación de treinta especialistas representantes de la Comunidad de investigación, desarrollo tecnológico e innovación[2], industria y órganos reguladores. Las organizaciones presentes en los talleres se indican a continuación:

- Secretaría de Energía, SENER
- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA
- Comisión Federal de Electricidad, CFE
- CEMIE-Geo
  - CICESE
  - UNAM
  - UMSNH
  - INEEL
- Sustentabilidad Energética Mexicana
- Grupo Dragón
- ENAL
- Geocónsul
- Green Momentum
- IES
- PI Ingenera
- Inversa
- Moonshot Fab
- Tlalli Energía

Durante los talleres, los participantes compartieron sus perspectivas actuales y futuras del desarrollo del sector, sus opiniones en relación con la capacidad instalada, los principales retos técnicos y barreras que limitan el crecimiento del sector, además de establecer una serie de acciones prioritarias sugeridas para la atención de los retos y barreras identificadas.

4. Construcción del mapa

La información colectada durante los talleres fue documentada para generar la versión preliminar del reporte de mapa de ruta. Los participantes recibieron un borrador en el que se indicó la visión de la posible evolución del sector que fue generada durante el taller, los principales retos y barreras identificadas, acciones prioritarias sugeridas, plazos de atención y diagrama preliminar del mapa de ruta, solicitándose su revisión y retroalimentación. Los comentarios recibidos se integraron en el documento final del mapa de ruta tecnológica, el cual se presentó al Grupo Consultivo para su aprobación.

Una vez finalizado el reporte del mapa de ruta, se realizó un análisis del mismo para especificar las necesidades tecnológicas derivadas de las problemáticas asociadas a los retos y acciones sugeridas. En general, las necesidades tecnológicas se refieren a carencias o deficiencias de capacidades tecnológicas específicas o de alguno de sus componentes, es decir conocimiento, infraestructura, procesos o metodologías de trabajo y herramientas. Las necesidades identificadas se documentaron en un reporte titulado Cartera de Necesidades de Innovación y Desarrollo Tecnológico de Usos Directos del Calor Geotérmico (SENER-IMP, 2018b). El objetivo de este documento es ofrecer información que sirva como base para generar iniciativas de proyectos específicos.

Fuentes de información consultadas

Las fuentes de información utilizadas incluyen documentos oficiales publicados por SENER, publicaciones técnicas y científicas, entrevistas con expertos técnicos y representantes de los sectores industria y gobierno, así como información recopilada directamente de los especialistas que participaron en los talleres. Dentro de los principales documentos oficiales

[2] La Comunidad de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación, está integrada por las Instituciones de Educación Superior y los Centros de Investigación y Desarrollo Tecnológico tanto Públicos como Privados, incluyendo a los CEMIEs.

consultados se encuentran: Las leyes de Energía Geotérmica (DOF, 2014a), de Transición Energética (DOF, 2015) y de Aguas Nacionales (DOF, 2014c); la Prospectiva de Energías Renovables 2017-2031 (SENER, 2017); el Inventario Nacional de Energías Limpias (SENER, 2015) y el Reporte de Avance de Energías Limpias, primer semestre 2017 (SENER, 2017), además del Mapa de Ruta en Geotermia (SENER-IMP, 2017). También se consultaron diversos estudios publicados sobre la capacidad instalada en México de usos directos de calor geotérmico y el estado de desarrollo de esta industria, así como documentos internacionales como el Programa de Tecnologías en Geotermia para Usos Directos de Calor del Departamento de energía de Estados Unidos (DOE-US, 2004), el Mapa de Ruta de Calor y Energía Geotérmica de la Agencia Internacional de energía (IEA, 2011), el reporte sobre la implementación del mapa de ruta en tecnología geotérmica (RHC, 2013) y el mapa de ruta de energía geotérmica (RHC, 2014), ambos publicados por la Plataforma Europea, entre otros documentos.

Actores involucrados en la elaboración del mapa de ruta

La generación del mapa de ruta involucró la participación de tres grupos de personas: Grupo Consultivo, equipo facilitador y especialistas. El Grupo Consultivo, estuvo conformado por directivos de SENER, CEMIE-Geo y CONACYT. Este grupo fue responsable de aprobar el enfoque y alcance del mapa, participantes, y la difusión de los resultados obtenidos. El equipo facilitador por su parte estuvo conformado por especialistas del Instituto Mexicano del Petróleo. Este grupo fue responsable de conducir el desarrollo del mapa, desde su conceptualización hasta la generación del reporte. Finalmente, el grupo de especialistas, integrado por los asistentes a los talleres y otros especialistas técnicos entrevistados, aportaron sus perspectivas, opiniones, así como comentarios al reporte de resultados del taller.

IMAGEN 1 BALNEARIO GEOTÉRMICO EN HÚSAVÍK, ISLANDIA

FUENTE: https://icelandmag.is

Generalidades de los usos del calor geotérmico

La energía geotérmica se define como aquella 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 (Dickson & Fanelli, 2003).

La geotermia presenta varias ventajas, entre las que se encuentra su alto potencial de aprovechamiento[3], su contribución a la mitigación de los problemas de cambio climático, de efecto invernadero y en general del calentamiento global de la Tierra (Fridleifsson, et al., 2008).

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 otro lado, considerando la presencia de fluidos, los sistemas pueden ser hidrotermales (con fluidos naturales) o de roca seca caliente (sin ellos; Santoyo *et al*., 2014). Los recursos geotérmicos de tipo hidrotermal están constituidos por una fuente de calor que usualmente es una cámara magmática, y por la roca almacenadora de los fluidos naturales, que normalmente es agua meteórica infiltrada a través de fallas y fracturas. La fuente de calor calienta el agua meteórica infiltrada a profundidad, lo cual da lugar a un yacimiento geotérmico cuyas temperaturas pueden ser 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 yacimientos vapor dominante o de líquido dominante.

El otro tipo de recursos son los llamados de roca seca caliente, que se caracterizan por la disponibilidad de una fuente de calor (roca caliente) y la ausencia de fluidos naturales, debido a las características geológicas propias de estos sistemas que generalmente son rocas cristalinas y no permeables. En la actualidad, este tipo de yacimientos no han sido explotados de manera comercial, pero son considerados como los más importantes en el futuro (Tester *et al*; 2007). En la Tabla 1 se muestran diferentes tipos de clasificación de los recursos geotérmicos.

Por otra parte, 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. Específicamente, la clasificación se refiere a sistemas geotérmicos de alta entalpía utilizados para generación eléctrica. En el caso de los usos directos del calor geotérmico esta clasificación no es muy útil, dado que los recursos que se utilizan en este tipo de usos son generalmente: el gradiente geotérmico natural, fuentes termales superficiales o someras, y en algunos casos las salmueras residuales de plantas geotermoeléctricas.

[3] Se estima que el calor total de la Tierra es del orden del os 12.6 billones de exajoules (12×10^{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 (5.4×10^{9} EJ). Este calor se disipa anualmente en la superficie terrestre a un ritmo de 1,388 exajoules (Dickson & Fanelli, 2003).

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)

Aplicaciones de Usos Directos del Calor Geotérmico

Los UDCG pueden definirse como el aprovechamiento de la energía del fluido geotérmico en forma de calor, sin la intervención de un medio que la convierta en otra formas de energía, tal como la electricidad (Jóhannesson & Chatenay, 2014b).

En el ámbito nacional, el artículo 2 del Reglamento de la Ley de Energía Geotérmica (DOF, 2014a), define como usos directos o diversos a aquellos usos en los que se puede aprovechar la energía geotérmica diferentes 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.

El agua geotérmica se ha utilizado durante milenios para diversas aplicaciones, entre las cuales destaca el uso para baños (Lund J. , 1996; Dickson & Fanelli, 2003; Kiruja, 2011). Actualmente existen diversas aplicaciones utilizadas en el mundo y que son factibles tanto técnica como económicamente. Muchos procesos y equipos, que requieren calor (hasta ciertas temperaturas), pueden usar este tipo de energía, siendo algunos de los usos más comunes el acondicionamiento de espacios (calentamiento y enfriamiento), acondicionamiento de invernaderos, secado de cultivos, piscicultura, deshielo, uso sanitario, actividades con fines terapéuticos y procesos industriales. Durante las últimas décadas, el uso de la energía geotérmica para calefacción ha aumentado dramáticamente y su uso para enfriamiento ha cobrado gran relevancia.

Considerando el sector donde se utilizan, las aplicaciones, pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Bombas de calor geotérmico
- Agricultura y agroindustria
- Usos industriales

IMAGEN 2 ACUACULTURA

FUENTE: http://ciencia.unam.mx

- Climatización de espacios
- Spas, balneología y albercas

A continuación se describen con mayor detalle estas aplicaciones.

Bombas de calor geotérmico

Las bombas de calor geotérmico (BCG), conocidas internacionalmente por su nombre en inglés: *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). De esta forma una BCG puede 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 que se acondicionará, mientras que en verano el calor se extrae del espacio que se acondicionará y se libera en el suelo, siendo este modo de operación similar al aire acondicionado.

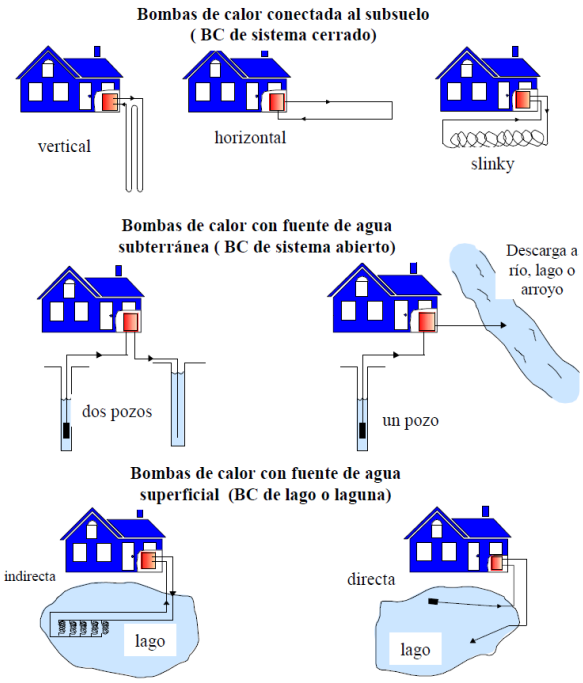
Las BCG se pueden instalar prácticamente en cualquier lugar (por ejemplo, casas-habitación, oficinas, hoteles, aeropuertos, estaciones de metro, talleres, escuelas, hospitales, centros recreativos y ranchos), y es la aplicación geotérmica de mayor capacidad instalada de usos directos del calor en el mundo. Los países líderes en unidades instaladas son Estados Unidos, China, Suecia, Alemania y Holanda. Es una tecnología madura y ampliamente usada a nivel comercial. Actualmente su desarrollo enfrenta retos relacionados principalmente con su alto costo inicial, pero sus costos de generación durante su ciclo de vida son menores que los de los sistemas convencionales debido a su eficiencia y menores costos de mantenimiento. (García & Martínez, 2012)

Agricultura y agroindustria

Los usos agrícolas y agroindustriales representan una parte muy relevante de las aplicaciones de los UDCG. En general se pueden identificar tres tipos de aplicaciones directas de la energía geotérmica en la agricultura y la agroindustria (Popovski, 2009):

- Acondicionamiento de invernaderos
- Acuacultura (granjas de peces o producción de algas)
- Procesos agroindustriales

FIGURA 2. ESQUEMA GENERAL DE UNA BCG



FUENTE: García-Gutiérrez & Martínez-Estrella, 2012.

En la agricultura y agroindustria se utilizan por lo general aplicaciones de fuentes geotérmicas de baja y media entalpía, así como el calor residual y el agua en cascada proveniente de las plantas geotermoeléctricas (Nguyen *et al*; 2015).

IMAGEN 3 ACONDICIONAMIENTO DE INVERNADEROS

FUENTE: http://www.thinkgeoenergy.com/large-scale-tomato-greenhouse-being-developed-in-tuscany/

Usos industriales

Diversos procesos industriales convencionales que utilizan calor generado por combustibles fósiles pueden sustituir este combustible por calor geotérmico mediante adaptaciones menores, manteniendo la eficiencia técnica y con competitividad económica (Jóhannesson & Chatenay, 2014c). Los procesos típicos relacionados con usos industriales del calor geotérmico son los siguientes (Lindal, 1992):

- Secado: Este proceso 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: Se emplea para concentrar soluciones, por ejemplo para obtener sal común. Este proceso también se emplea para la desalación de agua de mar y en cualquier proceso que requiera la vaporización de un soluto.

- Destilación: La destilación es comúnmente utilizada en la industria de los licores e hidrocarburos. Es un proceso de separación de mezclas, basado en la diferencia de volatilidad de los componentes en una mezcla liquida en ebullición.

- Refrigeración: Las bombas de calor por absorción que utilizan litio o bromuro, son ampliamente conocidas por ser un equipo adecuado para enfriamiento industrial o congelamiento con calor geotérmico.

- Procesos de pre-calentamiento, en los que el agua se pre-calienta con calor geotérmico, antes de ser enviada a una caldera.

- Acondicionamiento de espacios industriales, que puede ser un elemento específico durante un proceso industrial que requiera mantener una temperatura especifica.

- Otros procesos como extracción, lavado y secado, horneado, etc.

IMAGEN 4 PRUEBAS EN CAMPO DEL CICLO DE GENERACIÓN IDEA 10

FUENTE: Grupo iiDEA, UNAM

El mejor aprovechamiento de los usos directos del calor geotérmico dependen de la disponibilidad del recurso geotérmico y de la aplicación industrial que se busque, pero en general tienen costos competitivos, incluyendo las adaptaciones requeridas para su uso (Jóhannesson & Chatenay, 2014c).

Climatización de espacios

La climatización directa de espacios con energía geotérmica es una de las aplicaciones más comunes y utilizadas dentro de sus usos directos. Esto se consigue mediante el bombeo del fluido geotérmico a través de pozos, o con un intercambiador subterráneo colocado directamente en el pozo. Cuando el calor directo no es suficiente para climatizar un espacio, se pueden utilizar bombas de calor para impulsar la temperatura hasta los niveles deseados (Bloomquist, 2003).

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 se bombea 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 mediante un pozo inyector, o es aprovechado de nuevo en la superficie (Bloomquist, 2003).

IMAGEN 5 ACONDICIONAMIENTO DE EDIFICIOS

FUENTE: http://www.blackallmech.com

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

Spas, balneología y albercas

El fluido geotérmico o agua geotérmica se ha utilizado desde tiempos antiguos como tratamiento para diferentes afecciones a la salud. 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 sus 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, pero han cobrado un mayor auge en Europa y Japón (Lund J. , 1996).

La Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés) indica que la temperatura deseable del agua geotérmica para una alberca es de 27°C; sin embargo, esta temperatura puede variar más o menos 5°C, dependiendo de cada cultura y lugar donde se encuentren los balnearios. Si el agua geotérmica presenta una temperatura mayor, está debe enfriarse ya sea a través del mezclado con agua de menor temperatura, por aireación o mediante un pozo de retención. Si el agua geotérmica se utiliza directamente, se deberá establecer un proceso de flujo continuo para remplazar el agua (ASHRAE, 2011).

El diseño de los spas y balnearios es muy variable, pues depende de la cultura local, las características particulares del lugar, así como de los 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.

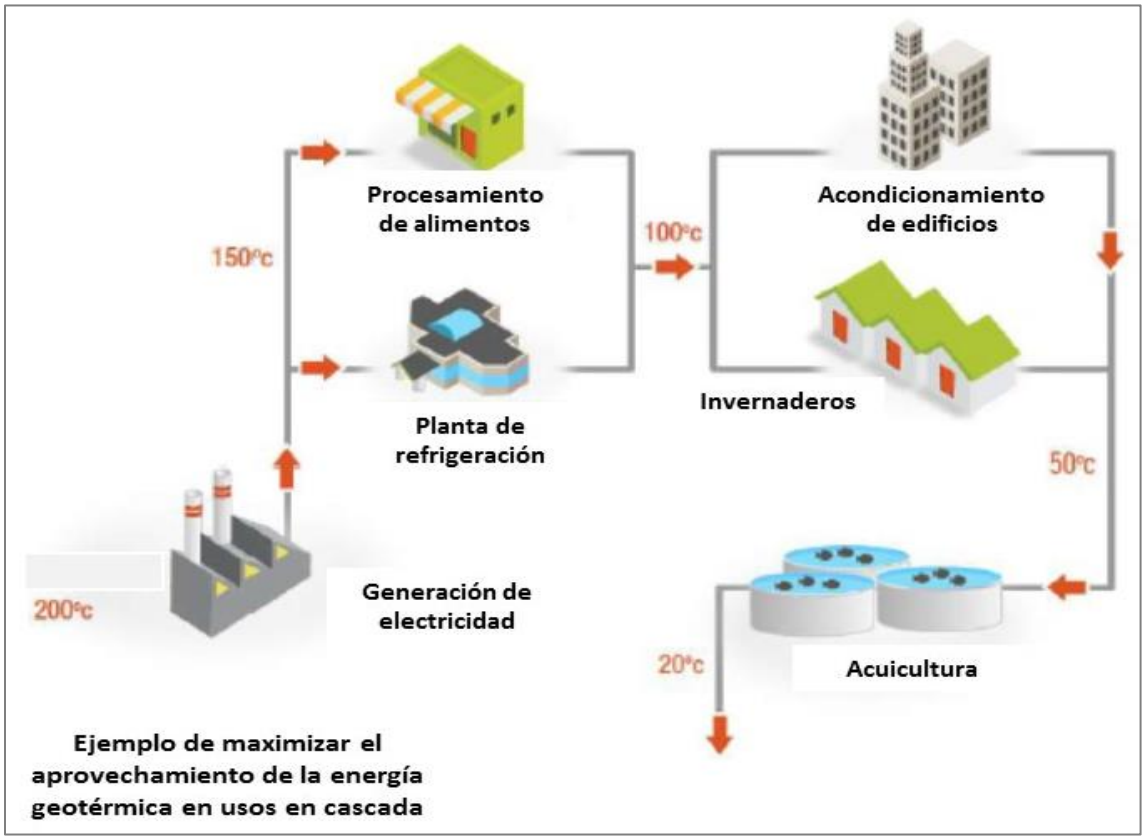
Usos en cascada o usos combinados

Los usos en cascada se identifican como el aprovechamiento secuencial del calor geotérmico en función de la temperatura del recurso, mediante la integración de diferentes tecnologías para la distribución y uso de energía térmica (Rubio-Maya et al., 2016).

Las aplicaciones individuales de usos directos no siempre generan retornos de 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 con suficiente temperatura para otra aplicación en serie, los costos de inversión también se pueden distribuir entre las diferentes aplicaciones haciendo los proyectos más rentables (CanGEA, 2014).

De tal manera, el fluido geotérmico residual de plantas geotermoeléctricas puede aprovecharse en aplicaciones de usos directos por medio de configuraciones de sistemas en cascada, teniendo la ventaja de hacer más rentable la inversión inicial. En la Figura 3 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)

Etapas de desarrollo de un proyecto de usos directos

El proceso de implementación de un proyecto de usos directos del calor puede dividirse en cuatro grandes etapas: a) Identificación, b) exploración, c) diseño y construcción y d) operación y mantenimiento. Cada una de estas etapas considera diferentes actividades que son clave para el proyecto, las cuales se muestran en la Figura 5 (Chatenay & Jóhannesson, 2014) y se describen a continuación, aunque es relevante mencionar que no todos los proyectos de UDCG incluyen todas esas etapas.

Identificación

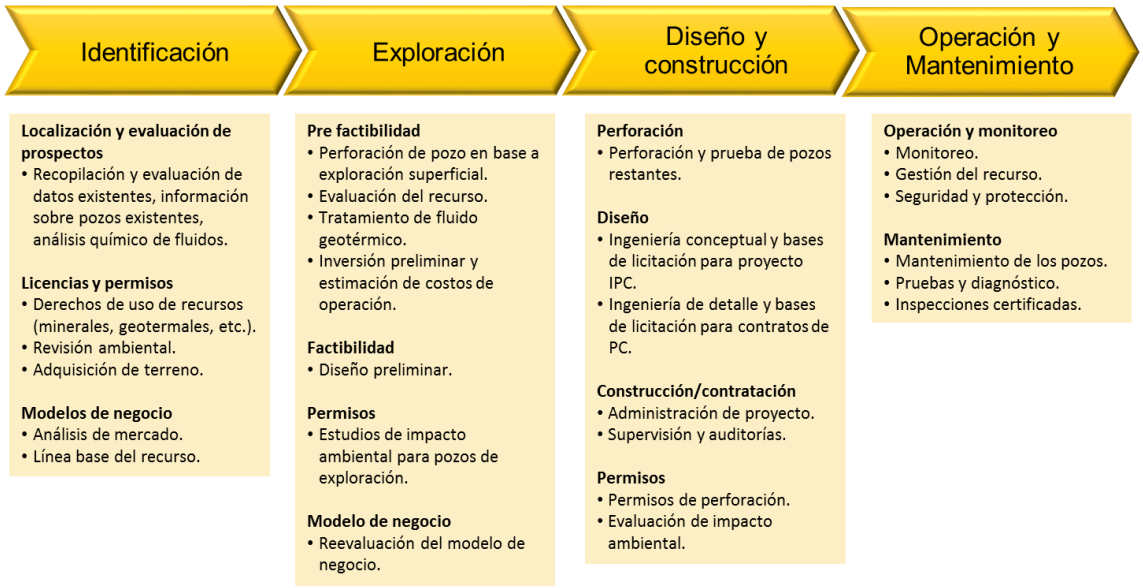
La fase de identificación de recursos incluye la recopilación y revisión de información geotérmica, datos sobre geología, geofísica y geoquímica del recurso, así como la obtención de las licencias y permisos correspondientes. Una vez que el recurso ha sido identificado correctamente, el desarrollador del proyecto decide si continuar con el proyecto o no.

Exploración

Durante la fase de exploración, generalmente se lleva a cabo un estudio de pre-factibilidad o evaluación preliminar de la dimensión que tendría el proyecto basado en la cuantificación y caracterización del recurso geotérmico.

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

FIGURA 4. ACTIVIDADES TÍPICAS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO



FUENTE: (Chatenay & Jóhannesson, 2014).

Diseño y construcción

El diseño preliminar y conceptual de un proyecto podría comenzar durante la fase de evaluación del recurso; 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 recurso (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 para considerar dentro del costo de estos equipos, aspectos relacionados con la corrosión e incrustación debido a los minerales disueltos en la salmuera (Lund J. , 2009).

IMAGEN 6 INSTALACIÓN DE EQUIPOS EN SITIO

FUENTE: Grupo iiDEA, UNAM

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.

IMAGEN 7 EQUIPOS OPERANDO EN CAMPO SAN PEDRO LAGUNILLAS, NAYARIT

FUENTE: Grupo iiDEA, UNAM

Capacidad instalada en el ámbito internacional

La Asociación Geotérmica Internacional (IGA, por sus siglas en inglés), realiza un inventario cada cinco años para estimar la capacidad instalada y utilización mundial de los diferentes UDCG (Lund & Boyd, 2015).

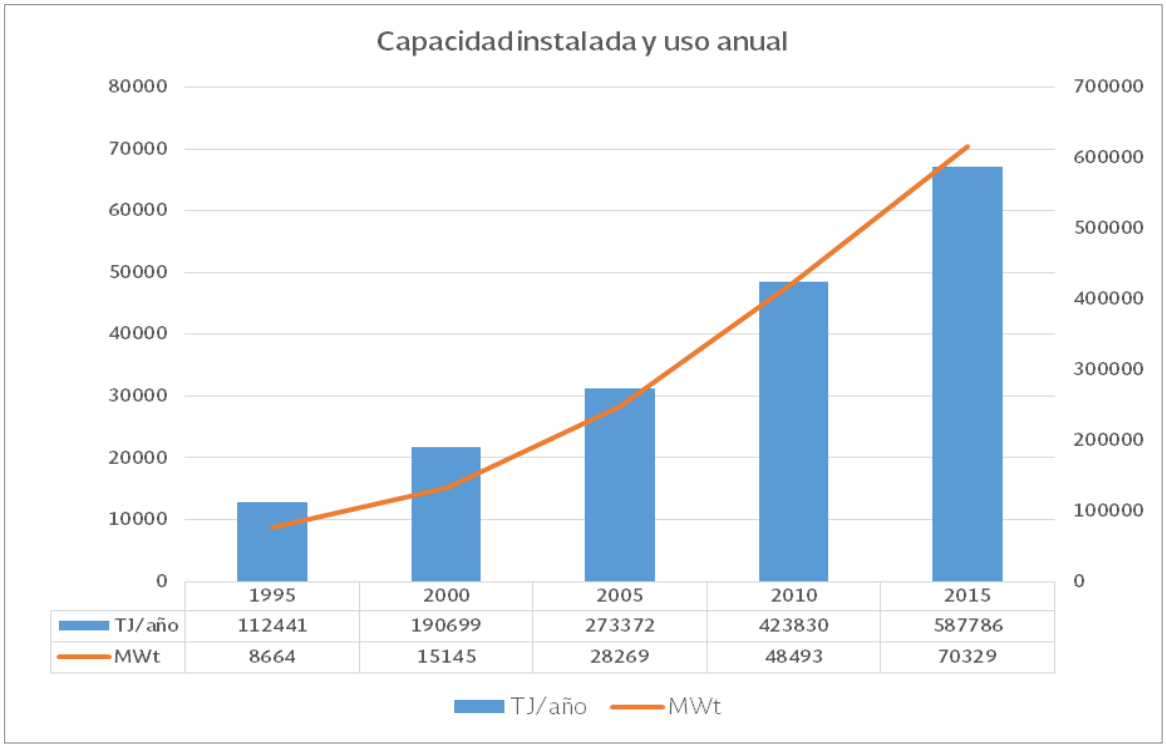
De acuerdo con tal inventario, hacia 2015 la capacidad total instalada a nivel mundial de UDCG era de 70,329 MWt, lo que representó un incremento de 45% con respecto a 2010, lo que a su vez indica a un crecimiento anual medio de 7.7%.

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.

Tanto la disminución del factor de capacidad como la de la tasa de crecimiento anual de UDCG se explican por el aumento 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 de usos directos durante el periodo de 1995 a 2015 se muestra en la Figura 5.

FIGURA 5. CRECIMIENTO DE LA CAPACIDAD INSTALADA Y APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA A TRAVÉS DE USOS DIRECTOS DEL CALOR (1995-2015)

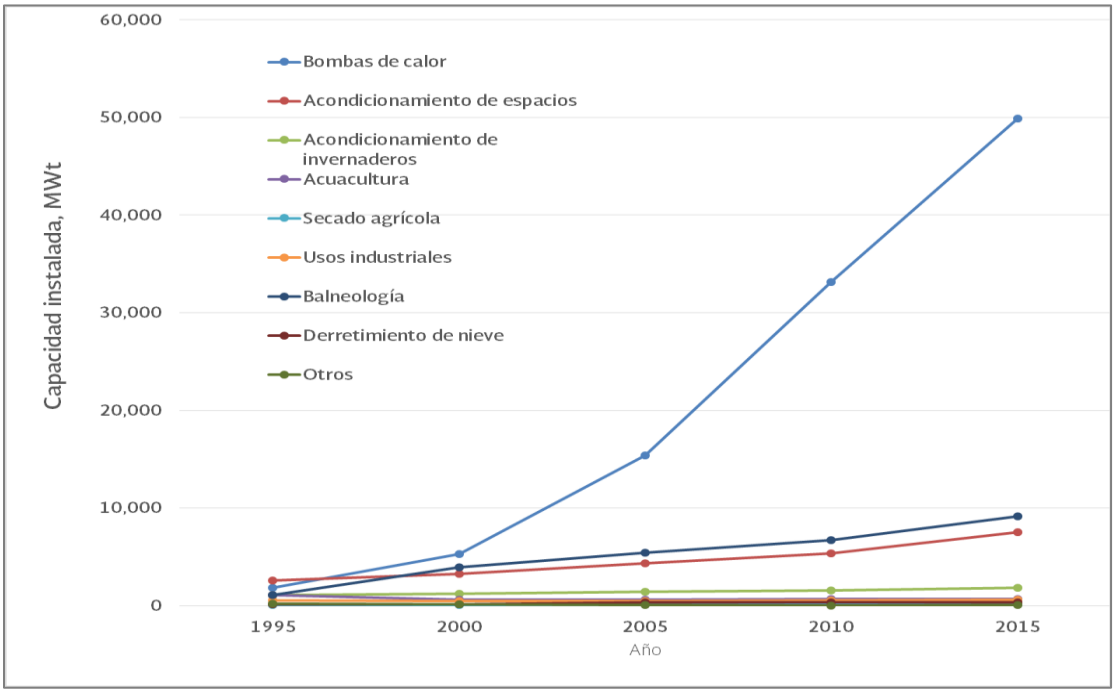


FUENTE: (Lund & Boyd, 2015)

Las figuras 6 y 7 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.

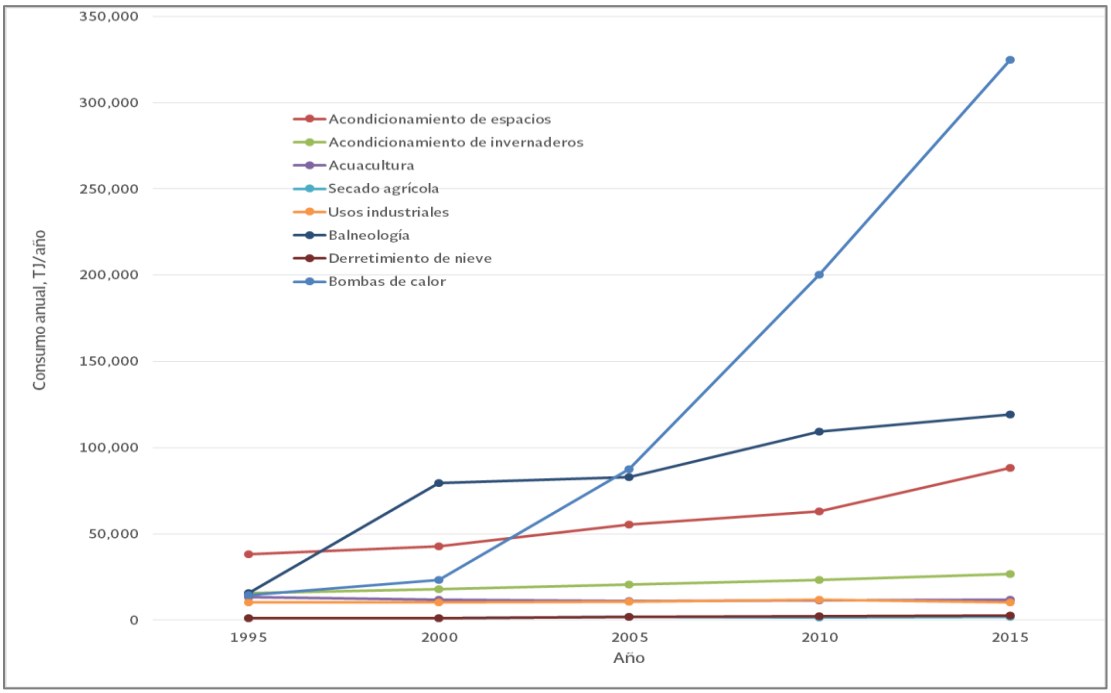
Por su parte, la Figura 8 presenta la capacidad instalada de cada una de las aplicaciones de los UDCG en 2015, y la Figura 9 indica la generación efectiva de calor de cada aplicación de UDCG para ese mismo año, expresada en porcentaje del total.

FIGURA 6. CAPACIDAD INSTALADA DE LAS DIFERENTES APLICACIONES DE UDCG (1995-2015)



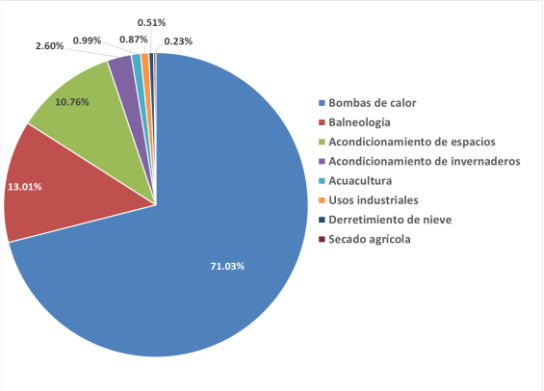
FUENTE: Basado en (Lund & Boyd, 2015)

FIGURA 7. USO ANUAL DE ENERGÍA EN APLICACIONES DE UDCG (1995-2015)



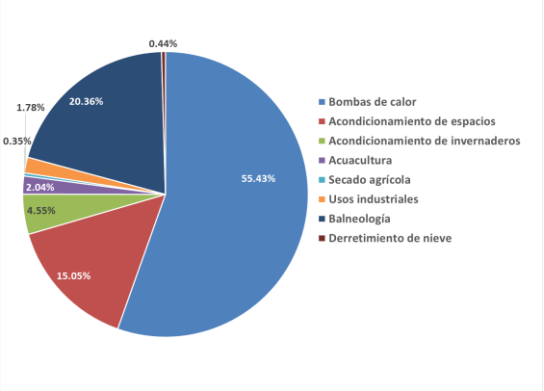
FUENTE: Basado en (Lund & Boyd, 2015)

FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN DE LA CAPACIDAD INSTALADA DE LAS DIFERENTES APLICACIONES DE USOS DIRECTOS DEL CALOR GEOTÉRMICO, 2015



FUENTE: Basado en (Lund & Boyd, 2015)

FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DEL USO DE LAS DIFERENTES APLICACIONES DE UDCG DURANTE 2015



FUENTE: Basado en (Lund & Boyd, 2015)

Estas últimas figuras confirman que las bombas de calor son la aplicación de UDCG más utilizada en el mundo, seguidas por la balneología, que incluye resorts, balnearios y centros terapéuticos, y en la tercera posición se encuentra el acondicionamiento de espacios.[4.]

Tendencias tecnológicas

La tecnología empleada en las distintas aplicaciones de los usos directos del calor, 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. Entre esas oportunidades están el desarrollo de materiales que mejoren la conductividad térmica, la formulación de agentes anticongelantes ambientalmente amigables, desarrollo de fluidos de trabajo con menor punto de congelación y menor viscosidad, así como el diseño de mejores 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.

Aspectos relacionados con costos de inversión de los proyectos de UDCG

En general, todos los proyectos geotérmicos tienen un mayor riesgo que los proyectos de energías renovables convencionales, debido a la dificultad e incertidumbre de identificar un recurso geotérmico comercial en el subsuelo. Esto eleva el costo inicial de inversión.

En gran parte de los casos[5], 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 proyectos de energías 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

[4] Esta categoría excluye a las bombas de calor, que también pueden emplearse para el acondicionamiento o climatización de espacios (Bloomquist, 2003).

[5] Se refiere principalmente a los proyectos que involucran las etapas de identificación y exploración de recursos geotérmicos, ya que estas actividades implican riesgos y altos costos debidos a la evaluación del recurso y la perforación de pozos.

energías renovables o 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 Tabla 2 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.

TABLA 2. 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[6]. • 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 remplazo	

FUENTE: Elaboración propia a partir de (Jóhannesson & Chatenay, 2014a)

[6] El comisionamiento se refiere a la adecuación de las instalaciones para el inicio de operaciones (por ejemplo: limpieza de tuberías, calibración de instrumentos, ejecución de procedimientos de arranque).

Situación nacional

México dispone de un gran potencial de recursos geotérmicos que se pueden aprovechar a través de las distintas aplicaciones de los UDCG, pero su desarrollo es muy incipiente. El año pasado se publicó el Mapa de Ruta de Geotermia (SENER-IMP, 2017), en el cual se abordan de manera general los UDCG, sin establecer una meta concreta de crecimiento para los próximos años. En este documento se definió la siguiente visión: *"Tener en el 2030 un mercado nacional desarrollado de usos directos del calor geotérmico"*.

Asimismo, se establecieron los principales retos técnicos para tres de las aplicaciones que se consideraron con mayor viabilidad de explotación comercial y demanda potencial en el país: bombas de calor, deshidratación de alimentos y usos industriales[7].

A pesar de que el Mapa de Ruta de Geotermia no profundizó en los UDCG, sí estableció algunos aspectos clave para su desarrollo en el país, por ejemplo, la implementación de acciones concretas para incentivar el mercado, establecer una regulación específica para los UDCG y fortalecer las capacidades tecnológicas nacionales para el diseño, operación y mantenimiento de instalaciones comerciales.

Recientemente la SENER inició diferentes iniciativas para impulsar los UDCG, y como parte de estas se consideró necesario realizar un Mapa de Ruta Tecnológico específico para esos usos, a fin de contar con un marco de referencia para realizar acciones tendientes a fortalecer las capacidades tecnológicas que se espera demande la industria en los próximos años.

En las siguientes secciones se presenta un panorama general del estado que guardan los UDCG en el país, específicamente en lo que respecta a su potencial de aprovechamiento, la capacidad instalada actual y las capacidades de investigación y desarrollo tecnológico disponibles.

Potencial de aprovechamiento de los Usos Directos del Calor Geotérmico

No existen datos confiables y actualizados sobre el potencial geotérmico específico para usos directos en México, pero existe cierta información que se puede utilizar para estimar los recursos existentes. Entre esta se encuentra la siguiente:

- Inventario Nacional de Energías Limpias (SENER, 2015).
- Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (AZEL).
- Estimaciones y estudios realizados por diferentes autores sobre el potencial geotérmico en México.
- Capacidad instalada actual de plantas geotermoeléctricas (para estimar el potencial de aplicaciones en cascada).

De acuerdo con Hiriart et al. (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 es el publicado por Vicente Torres en los años noventa (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 unas 2,332 manifestaciones termales, distribuidas en 27 estados del país.

Por otra parte, de acuerdo con Iglesias & Torres (2003) en México se han realizado evaluaciones preliminares de reservas geotérmicas a partir de 276 manifestaciones hidrotermales. Con ello se estimó que las reservas geotérmicas en estos sitios están en el intervalo de 7.7 x 10^{16} y 8.6 x 10^{16} kJ (2.14 x 10^{10} a 2.39 x 10^{10} MWt). La distribución de temperaturas asociadas en estos sitios está entre 60 y 180°C. Se estima que la energía correspondiente a estas reservas está entre 3.08 x 10^{17} y 3.45 x 10^{17} kJ (esto es, de 8.56 x 10^{10} a 9.58 x 10^{10} MWt).

Capacidad instalada

Existe poca información documentada sobre la capacidad instalada de los UDCG en el país. Uno de los estudios más recientes que presenta datos al respecto es el publicado por Gutiérrez Negrín et al. (2015); en éste se muestra que 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), tal y como se muestra en la Tabla 3. En este mismo estudio se presenta una relación de las aplicaciones existentes y su localización.

Existen aplicaciones de UDCG que no han sido implementadas en el país como son: procesos industriales, piscicultura, granjas de animales,

[7] Calefacción de piscinas, precalentamiento para procesos industriales, recuperación de minerales, piscicultura, acuicultura, secado de productos y fabricación de papel.

derretimiento de nieve, aire acondicionado y las bombas de calor geotérmico (Gutiérrez-Negrín *et al;* 2015).

TABLA 3. 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).

Durante los talleres para la integración de este Mapa de Ruta Tecnológica, se recopiló entre los asistentes información referente a proyectos de los que tiene conocimiento, así como de algunas de sus características. Esta información tiene como propósito establecer una referencia actualizada de los proyectos de UDCG en el país. En las Tablas 4 a 6 se presenta la información de los proyectos identificados, agrupados con base en la categoría de aplicación.

TABLA 4. PROYECTOS CORRESPONDIENTES A APLICACIONES EN CASCADA

Tipo de proyecto	Ubicación	Inicio	Estado de desarrollo	Alcance	Participantes	Observaciones
Deshidratador de alimentos geotérmico	Domo de San Pedro, Nayarit.	2017	O	C	Grupo iiDEA	Capacidad aproximada de 4.5 MWt Financiamiento privado y del CEMIE Geo.
Secado de madera	Los Azufres, Mich.	Aprox. 1988	A	D	CFE	Proyecto en cascada, aprovechando el agua residual producida por los pozos productores de la CFE en el campo los Azufres
Climatización de oficinas	Los Azufres, Mich.	Aprox. 1988	O	D	CFE	Proyecto en cascada, aprovechando el agua residual producida por los pozos productores de la CFE en el campo Los Azufres. Capacidad aprox. 0.4 MWt, financiamiento público.
Deshidratador de frutas y verduras	Los Azufres, Mich.	Aprox. 1988	A	D	CFE	Proyecto en cascada, aprovechando el agua residual producida por los pozos productores de la CFE en el campo Los Azufres.
Invernadero	Los Azufres, Mich.	Aprox. 1988	A	D	CFE	Proyecto en cascada, aprovechando el agua residual producida por los pozos productores de la CFE en el campo Los Azufres.
Producción de hongos comestibles	Los Humeros, Pue.	Aprox. 1988	A	D	CFE	Proyecto en cascada, aprovechando el agua residual producida por los pozos productores de la CFE en el campo Los Humeros.

Fuente: (IMP-SENER, 2018)

EP= En estudios de mercado y anteproyecto; O= Operación; A= Abandonado

P= Prototipo; D= Demostración; C= Comercial

TABLA 5. PROYECTOS CORRESPONDIENTES A OTRAS APLICACIONES

Tipo de proyecto	Ubicación	Estado de desarrollo	Alcance	Participantes	Observaciones
Invernadero de Hortalizas	Poncitlán, Jal.	O	C	CEO Hortalizas, Argaman, Eli Sitton	En proceso de obtención de los permisos correspondientes.
Balneario de Ojo Caliente	Candela, Coah.	O	C	-	-
Balneario termal, San Joaquín	Arizpe, Coah.	O	C	-	-
Balnearios	Hidalgo	O	C	Comunidades	-
Balneario de Aguas termales	Chignahuapan, Pue.	O	C	-	Actualmente abierto al público
Desaladora de agua mar	Los Cabos, BCS.	EC	D	Grupo iiDEA	La capacidad de la desaladora es de 40 m^3.
Secado de "Jara" para palmas	Tecozautla, Coah.	O	C	-	-
Deshidratador de alimentos	Morelia, Mich.	-	P	CEMIE-Geo	

FUENTE: (IMP-SENER, 2018)

EC= En construcción; O= Operación; D= Demostración; C= Comercial; P=Piloto

TABLA 6. PROYECTOS CORRESPONDIENTES A BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICO

Aplicación	Ubicación	Inicio	Estado de desarrollo	Alcance	Participantes	Observaciones
Climatización de edificio	Cuernavaca, Mor.	2018	EC (40% aprox.)	D	INEEL CEMIE-Geo	Capacidad total: 14kW (4 toneladas) Fuente sumidero: Agua-Aire Intercambiador horizontal slinky
Climatización de laboratorios	Mexicali, B.C.	2017	EC (60% aprox.)	D	INEEL UPBC CEMIE-Geo	Capacidad total: 42kW (12 toneladas) Fuente sumidero: Agua-Aire Intercambiador slinky y vertical
Acondicionamiento de espacios (principalmente calefacción): Climatización de Preescolar y Clínica IMSS	Los Humeros, Pue.	2018	O	D	INEEL CEMIE-Geo CFE	Capacidad total: 21kW (6 toneladas) Fuente sumidero: Agua-Aire y Combo + Agua-Aire Agua-Agua Intercambiador horizontal slinky Proyecto con impacto social en una comunidad marginada del estado de Puebla.
Acondicionamiento de espacios (fraccionamiento)	Acapulco, Gro.	2018	EP	C	Empresa Privada	12 cabañas de dos tipos.
Sistema didáctico portátil	Morelia, Mich.	-	O	D	UMSNH CEMIE-Geo	Capacidad total: 2.6kW (0.75 toneladas) Fuente sumidero: Agua-Aire 3 intercambiadores de 100m, conversión serie, paralelo
Sistema de climatización	Ciudad de México	2017	EC	D	II UNAM	Capacidad: 5 toneladas de refrigeración.
Climatización de invernadero	Mexicali, B.C.	2016	O	D	INEEL CEMIE-Geo UPBC	Capacidad total: 35kW (10 toneladas) Fuente sumidero: Agua-Aire Intercambiador slinky y vertical
Climatización de edificios	Morelia, Mich.	2014	O	D	UMSNH CEMIE-Geo	Capacidad total: 35kW (10 toneladas) Fuente sumidero: Agua-Aire Intercambiador slinky y vertical

FUENTE: Elaborada con información de (IMP-SENER, 2018) y (García G. Alfonso, 2018).

EP= En estudios de mercado y anteproyecto; EC= En construcción; O= Operación.

D= Demostración; C= Comercial

En total se identificaron veintiún proyectos, de los cuales siete pertenecen a usos en cascada, ocho están orientados a diversas aplicaciones y seis corresponden a bombas de calor geotérmico; asimismo, ocho son de tipo comercial y trece son de demostración.

De los proyectos comerciales, uno se enfoca en la deshidratación de alimentos y está ubicado en las instalaciones del Grupo Dragón en el campo geotérmico del Domo de San Pedro, Nayarit, otro es el proyecto de acondicionamiento de invernaderos en Jalisco, de la empresa Hortalizas Argaman, S.A. de C.V., y el tercero corresponde a un sistema de acondicionamiento de cabañas para un fraccionamiento de Acapulco, Guerrero. El resto de las instalaciones comerciales en operación corresponden a balnearios.

Los proyectos de aplicaciones en cascada son en su mayoría de tipo demostrativo y se enfocan principalmente en deshidratado de alimentos, secado de madera, acondicionamiento de invernaderos y climatización de oficinas. De un total de siete proyectos identificados en esta categoría, cinco fueron impulsados por la CFE en los campos geotérmicos de Los Azufres, Mich., y Los Humeros, Pue., con la finalidad de demostrar de manera práctica la manera de aprovechar parte del fluido residual de sus plantas geotérmicas ubicadas en esos campos. De todos ellos, solo uno continúa en operación (climatización de oficinas).

Por otro lado, los proyectos correspondientes a la categoría de bombas de calor se aplican principalmente para el acondicionamiento de espacios y solo uno de ellos es comercial. Los demás son proyectos demostrativos que llevan a cabo centros de investigación e instituciones de educación superior.

Geográficamente, los proyectos están ubicados principalmente en los estados de Michoacán, Baja California, Coahuila, Hidalgo, Jalisco y Nayarit.

Capacidades de soporte para la realización de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Con relación a las capacidades tecnológicas de soporte existentes en el país, en febrero de 2014 el Gobierno Federal creó 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.

Actualmente en el CEMIE-Geo se desarrollan seis proyectos que pertenecen a la línea estratégica de UDCG que se enfocan en bombas de calor, sistemas en cascada y aplicaciones con fluido. También se ejecutan cuatro proyectos de aplicación transversal a Usos Directos y a Generación de Electricidad que se orientan a estimar y caracterizar el recurso geotérmico (Ver tabla 7).

Reconociendo que el número de especialistas involucrados en la realización de proyectos geotérmicos en el país es reducido, el CEMIE-Geo promueve la formación de recursos humanos especializados en geotermia en tres niveles: diplomado, maestría y doctorado, como parte de la oferta educativa de las instituciones que forman el consorcio. Con este proyecto se busca el fortalecimiento de las capacidades de recursos humanos.

TABLA 7. 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)

Finalmente, con base en una búsqueda realizada en bases de datos especializadas[8], 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).

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

Visión al 2030

La geotermia es una energía renovable que además de utilizarse para generar energía eléctrica también se emplea en usos directos que aprovechan el calor mediante diversas aplicaciones, por ejemplo: climatización de espacios, procesos industriales, acondicionamiento de invernaderos, acuacultura, secado agrícola y balneología. A nivel internacional, esta tecnología es madura y comercialmente disponible, como lo demuestra su empleo cada vez mayor en diversos países[9], entre los que se encuentran: China, Estados Unidos[10] e Islandia[11] (Lund & Boyd, 2015).

Mientras que México ocupa a nivel mundial el sexto lugar en capacidad instalada para generación de electricidad con energía geotérmica (SENER, 2016), los usos directos en el país están subutilizados (156 MWt), lo que lo ubica en el trigésimo primer puesto mundial con el 0.2% de la capacidad instalada global (Sánchez, 2015; Lund & Boyd, 2015). Esto representa una fracción muy pequeña de los recursos geotérmicos nacionales de baja y mediana temperatura (Torres Luna et al., 2016). Los usos directos que actualmente están en operación se concentran casi exclusivamente en instalaciones como balnearios y spas (Gutiérrez Negrín *et al;* 2015).

En contraste, el gobierno mexicano ha realizado diferentes esfuerzos para promover el aprovechamiento de la geotermia. Particularmente, a finales del año 2014 se publicó la Ley de Energía Geotérmica (LEG), con el objetivo de regular el reconocimiento, exploración y explotación de los recursos geotérmicos nacionales y ofrecer certidumbre a los proyectos. Asimismo, se modificaron un par de artículos de la Ley de Aguas Nacionales para hacerlos compatibles con la LEG, específicamente en la definición del término aguas geotérmicas y su aprovechamiento.

En sintonía con estas acciones, también se han implementado instrumentos económicos para impulsar el aprovechamiento de las energías limpias, algunos de los cuales también podrían promover los usos directos de la geotermia. Entre ellos se encuentra el Proyecto de Eficiencia y Sustentabilidad Energética en Municipios, Escuelas y Hospitales (PRESEMEH) cuyo objetivo es desarrollar y probar mecanismos operacionales y financieros sustentables para inversiones en eficiencia energética. Otro ejemplo son los programas de financiamiento para proyectos de eficiencia energética y energías renovables del FIDE (Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica).

Aunado a las acciones que se han mencionado, existen otras razones para impulsar el crecimiento de los UDCG. Entre las más relevantes se encuentran las siguientes:

- México cuenta con abundantes recursos geotérmicos, tanto superficiales como someros[12] que pueden ser aprovechados sin demandar gran inversión.
- Se ha demostrado que los proyectos de usos directos contribuyen al desarrollo económico de las zonas donde se implementan, particularmente, cuando las aplicaciones se configuran en cascada.
- Esta fuente de energía puede contribuir al cumplimiento de las metas nacionales de disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Es una tecnología que abona a la eficiencia energética.

Tomando en cuenta el contexto mencionado, se determinó una visión al año 2030 sobre la capacidad instalada que se considera factible alcanzar. Para hacerlo, diversos especialistas reconocidos por su experiencia y conocimiento en el tema, provenientes del gobierno, la industria y la Comunidad de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación (CoIDT+i), analizaron la información disponible como la capacidad instalada reportada, la perspectiva de crecimiento de esta fuente de energía en el país (Gutiérrez-Negrín *et al*; 2015), el potencial de crecimiento del mercado nacional de calor en usos agroindustriales y de climatización de espacios (García & Torres, 2016), los resultados de los proyectos piloto que se han realizado y los datos del crecimiento de las diferentes aplicaciones en el ámbito internacional (Lund & Boyd, 2015).

Con base en este análisis, los especialistas establecieron en consenso la siguiente visión: "**Contar en el año 2030 con un mercado nacional desarrollado de usos directos del calor geotérmico, con una capacidad instalada de 3800 MWt**".

Es importante señalar que para fines de este mapa de ruta, el análisis de la evolución del crecimiento de las aplicaciones de los usos directos se realizó considerando tres categorías, establecidas en función del tipo de

[9] Los usos directos de la energía geotérmica son empleados en 83 países lo cual representa un 15% de incremento sobre los 72 reportados en 2010. (Lund, 2015).

[10] De acuerdo con Lund (2015) China y Estados Unidos son los países con mayor capacidad instalada en el mundo.

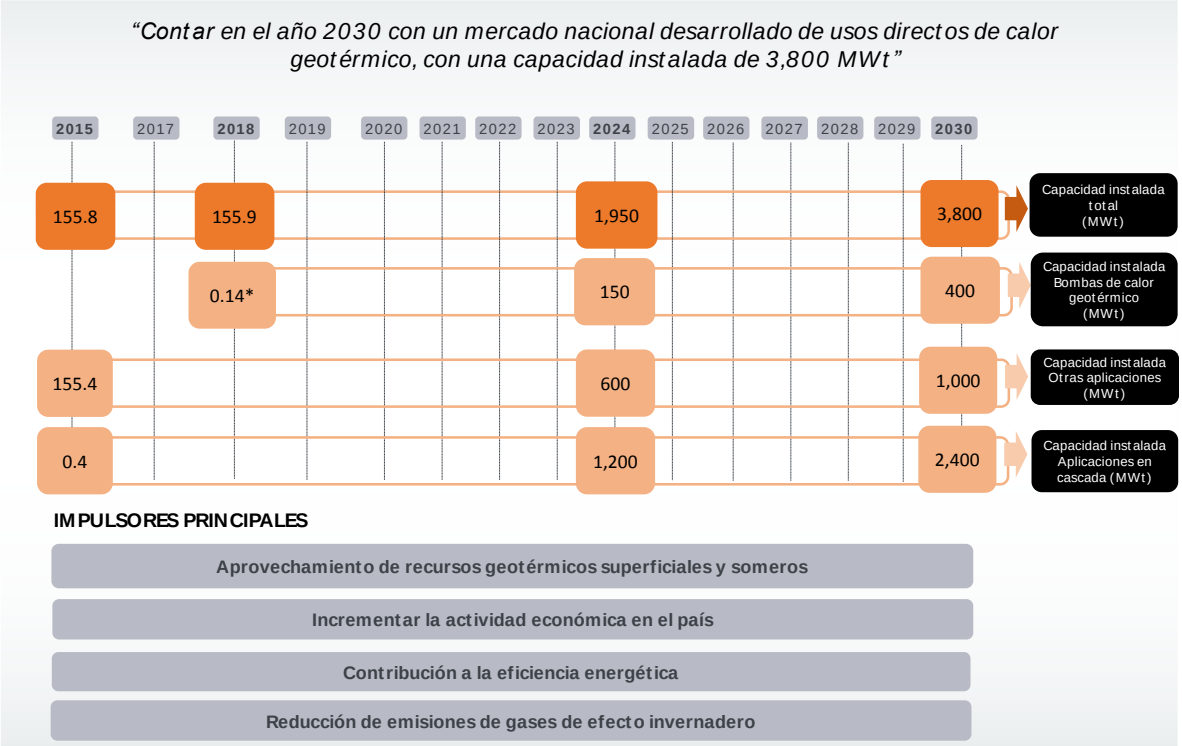
[11] Islandia es el país con la mayor capacidad instalada por habitante en el mundo.

[12] Recursos superficiales se refieren a manantiales, arroyos, lagos, etc., mientras que los recursos someros son acuíferos que se encuentran a profundidades menores a 500 m., a diferencia de los yacimientos de alta entalpía que generalmente están a más de 1500 o 2000 m (Geothermal Communities Project: European Union, 2017).

recurso geotérmico a utilizar y de la regulación aplicable. Estas categorías son: a) aplicaciones en cascada, b) otras aplicaciones y c) bombas de calor geotérmico.

En la figura 10 se presenta de manera esquemática la evolución de las metas de capacidad instalada que se considera factible alcanzar para los años 2024 y 2030.

FIGURA 10. VISIÓN PARA EL DESARROLLO DE LOS USOS DIRECTOS DEL CALOR GEOTÉRMICO AL AÑO 2030



* Correspondiente a la capacidad instalada de 13 bombas de calor en cuatro proyectos demostrativos del CEMIE-Geo. Fuente. CEMIE-Geo, 2018.

Es relevante enfatizar que la visión que se propone en este documento supone que en los próximos años continuará el impulso al aprovechamiento de esta energía, mediante las políticas públicas existentes y su profundización, las cuales buscan incentivar el desarrollo del mercado y captar el interés de los inversionistas por este tipo de tecnología.

A continuación, se describe con detalle la visión particular para cada una de las categorías consideradas y las premisas empleadas para su definición.

I. Aplicaciones en cascada

Los usos directos en cascada se identifican como un medio de operación secuencial del calor geotérmico en función de la temperatura del recurso, mediante la integración de diferentes tecnologías para la generación, distribución y uso de energía térmica (Rubio-Maya et al., 2016).

Entre las aplicaciones que se incluyen en esta categoría se encuentran las siguientes:

- Acondicionamiento de espacios

- Acuacultura (calentamiento de estanques)
- Refrigeración
- Usos industriales
- Acondicionamiento de invernaderos y otras aplicaciones en agricultura
- Secado de madera y deshidratación de vegetales
- Desalación de agua de mar o salobre
- Spas, balneología, albercas

Las metas de corto y mediano plazo para las aplicaciones en cascada se establecieron en función de los campos geotérmicos que están operando actualmente en el país, los cuales dejan como subproducto una enorme cantidad de fluido residual caliente que se puede aprovechar en otras aplicaciones. Sin embargo, las aplicaciones en cascada no se limitan a plantas geotérmicas, sino que también incluyen aplicaciones que utilizan el fluido residual proveniente de una aplicación previa de UDCG.

Por ejemplo, el agua de un pozo que sale a unos 75°C podría aprovecharse en un primer uso directo para secar madera. Después, la misma agua, que ha perdido unos 20°C, se podría utilizar a 55°C para acondicionar un invernadero, de donde saldría tal vez a unos 35-40°C, temperatura todavía suficiente para emplearse en una alberca, antes de quedar a temperatura ambiente y regresarla al subsuelo mediante un pozo inyector. Este sería un ejemplo de usos geotérmicos directos en cascada.

De tal manera, la meta de 2400 MWt en cascada para el año 2030 podría incrementarse conforme evolucione la industria de los UDCG en el país.

Al respecto, México cuenta con capacidades científicas y tecnológicas para el diseño y ejecución de este tipo de proyectos. Ejemplo de lo anterior, es la experiencia acumulada por la CFE, que en el pasado llevó a cabo proyectos piloto de este tipo los campos geotérmicos de Los Azufres y Los Humeros (ver Tabla 4). Como se mencionó, estas aplicaciones de nivel demostrativo incluían secado de madera, deshidratación de frutas y vegetales, climatización para invernaderos y sistemas de calefacción para las oficinas e instalaciones de la propia CFE en Los Azufres. A la fecha, todas esas aplicaciones fueron desmanteladas después de cumplir su función demostrativa sin mayor repercusión, con excepción del sistema de calefacción y de producción de agua caliente para uso propio en las instalaciones de la CFE, que equivale a unos 0.47 MWt de capacidad instalada (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015).

En años recientes, PI Ingenera y el Grupo iiDEA del Instituto de Ingeniería de la UNAM, con el financiamiento del CEMIE-Geo (proyecto 11) han realizado esfuerzos para la instalación de un proyecto piloto de deshidratación de alimentos en el campo geotérmico del Domo San Pedro, ubicado en el estado de Nayarit, usando el calor residual de la planta geotermoeléctrica del Grupo Dragón. Entre los beneficios de este proyecto está proporcionar valor agregado a los productos agrícolas de la región, apoyando así a mejorar la actividad productiva y económica de las comunidades cercanas a estas instalaciones.

Una de las grandes ventajas para el desarrollo de proyectos en cascada asociados a plantas geotermoeléctricas, es que no requieren inversiones adicionales para la perforación de pozos, y representan un factor significativo para incrementar la rentabilidad de la planta.

Desde la perspectiva de los especialistas que participaron en los talleres para la integración del mapa de ruta, se estima que actualmente existe un volumen disponible de alrededor de 71 millones de metros cúbicos de agua caliente al año en los cinco campos geotérmicos en operación, que equivalen a más de 8 mil metros cúbicos por hora de fluido residual[13], como subproducto de la operación de las plantas geotermoeléctricas existentes. Además, se prevé que para el año 2030 la capacidad de generación total del país llegue a unos 1750 MWe (SENER-IMP, 2017), lo que en principio, podría representar otros 4 a 5 mil metros cúbicos por hora de este fluido.

Con base en lo anterior y asumiendo que por cada MWe es posible aprovechar de manera secundaria 1.5 MWt[14], se considera técnicamente factible contar con una capacidad instalada para aplicaciones en cascada de 1200 MWt en el año 2024 y de 2400 MWt en el año 2030[15].

Cabe mencionar que un aspecto que influye en el potencial aprovechable de este tipo de usos geotérmicos directos está relacionado con la cantidad y calidad del agua caliente residual de las plantas geotermoeléctricas, porque en ciertos casos los usos en cascada pueden ser muy limitados.

[13] Fluido residual, agua caliente residual y salmuera residual se consideran sinónimos.
[14] Factor definido a partir de la experiencia de las plantas geotermoeléctricas actuales en Islandia.
[15] La meta fue ajustada considerando que la eficiencia y la calidad del agua geotérmica pueden influir en el aprovechamiento de la energía.

II. Otras aplicaciones

En este grupo se excluyen aplicaciones en cascada que utilizan el fluido residual proveniente de la operación de plantas geotermoeléctricas o de otras aplicaciones, así como a las bombas de calor geotérmico. En estos casos, el recurso geotérmico proviene directamente del subsuelo o de fuentes superficiales, lo que implica que el proyecto incluye las etapas de identificación, exploración y extracción del fluido geotérmico.

Habrá casos en los que el recurso se encuentre disponible superficialmente, como por ejemplo en manantiales superficiales; en estos casos no es necesario realizar actividades de perforación para aprovechar el recurso, y por lo tanto los costos serán diferentes.

Las aplicaciones del recurso geotérmico superficial son básicamente las mismas que se mencionaron para la categoría de aplicaciones en cascada: acondicionamiento de espacios, acuacultura, refrigeración, secado de madera, invernaderos, balnearios y spas, etc.

La tecnología para la ubicación y desarrollo de este tipo de usos directos está en su etapa de madurez, y en general es poco sofisticada.

Considerando que la tecnología ya está ampliamente probada y que varios de los procesos industriales convencionales que utilizan calor a partir de combustibles fósiles, se pueden cambiar a calor geotérmico con adaptaciones menores, manteniendo la eficiencia técnica y la factibilidad económica (Jóhannesson & Chatenay, 2014c), se estima que es posible cubrir un porcentaje de la demanda de calor industrial, tanto actual como futura, con recursos geotérmicos sustituyendo el uso de combustibles fósiles.

Para establecer las metas al 2030 de este grupo de aplicaciones, se plantearon tres escenarios de capacidad instalada con distintas tasas de crecimiento anual que tomaron como referencia la tendencia de crecimiento de las aplicaciones de usos directos a nivel internacional y los datos de los proyectos actuales y futuros del CEMIE Geo.

IMAGEN 8 DESALADORA MODULAR GEOTÉRMICA, PROTOTIPO DE 3 M^3 DÍA

FUENTE: Grupo iiDEA, UNAM

Basado en lo anterior, se estima viable que para el año 2024 se podría alcanzar una capacidad instalada de 600 MWt, lo que equivaldría a cuadruplicar la capacidad instalada del año 2015. Asimismo, se prevé que en el año 2030 el país podría llegar a los 1000 MWt, lo cual implica un crecimiento de seis veces con respecto a la capacidad instalada estimada en 2015.

La meta establecida al año 2030, equivale a la sustitución de 1.7% de la demanda actual de calor de los sectores industrial y agropecuario[16].

III. Bombas de calor geotérmico

El empleo de las bombas de calor geotérmico ha crecido considerablemente en los últimos años debido principalmente a que pueden instalarse prácticamente en cualquier lugar (García & Martínez, 2012). Aunque sus costos de inversión iniciales son altos, es una tecnología rentable respecto a las convencionales, debido a sus bajos costos de operación y mantenimiento.

En México la implementación de bombas de calor geotérmico a nivel comercial es prácticamente nula. Las experiencias nacionales derivan fundamentalmente de los proyectos piloto que el INEEL, la UPBC y la UMSNH han realizado a través de proyectos demostrativos del CEMIE-Geo. Actualmente se tienen instaladas trece bombas de calor geotérmico que en total tienen una capacidad de 149.6 kW, en cuatro proyectos demostrativos de CeMIE-Geo: acondicionamiento de un invernadero en Mexicali, B.C (UPBC), climatización en un herbario de la UMSNH en Morelia, Mich. (UMSNH), climatización de una clínica y una escuela preescolar en Los Humeros, Pue. (INEEL) y climatización de un laboratorio de la UPBC en Mexicali, B.C. (INEEL).

Adicionalmente se están haciendo esfuerzos para identificar condiciones favorables tanto técnicas como

[16] De acuerdo al Balance Nacional de Energía 2016, el consumo de calor en México en 2015 fue de 1861.05 PJ, equivalente a 59,013.51 MWt con un 100% de eficiencia.

económicas para la instalación de este tipo de sistemas en diferentes estados, entre los que se destacan Baja California, Nuevo León y Chihuahua (García & Torres, 2016).

En nuestro país existen zonas en las que predomina el clima cálido y otras donde estacionalmente se presentan temperaturas muy bajas. En estos lugares las bombas de calor geotérmico tienen una oportunidad de desarrollo importante, por sus costos de generación competitivos respecto a tecnologías convencionales que emplean energía eléctrica.

Otro elemento que se considera promotor de esta tecnología son las políticas e incentivos nacionales e internacionales que buscan impulsar las energías renovables y que pueden ser aprovechados para el desarrollo del mercado de bombas de calor geotérmico.

Además, tomando como base las experiencias nacionales en el desarrollo del mercado de otras tecnologías como la fotovoltaica y la termosolar, se considera factible desarrollar este mercado en el mediano plazo.

Para establecer las metas al 2030 de las bombas de calor geotérmico, se plantearon tres escenarios de capacidad instalada con distintas tasas de crecimiento anual que tomaron como referencia el crecimiento promedio de las bombas de calor a nivel internacional, así como los datos de los proyectos actuales y futuros del CEMIE Geo.

Con base en lo anterior, se cree viable que para el año 2024 se alcance una capacidad instalada de 150 MWt con bombas de calor geotérmico, considerando los proyectos instalados y aquellos que están en proceso, además de los resultados de los estudios de mercado realizados por el CEMIE-Geo (García & Torres, 2016). Es importante señalar que se considera que la adopción de esta tecnología será incremental y durante este periodo se desarrollarán las capacidades técnicas para su despliegue en el país, por lo que es relevante mantener los incentivos que actualmente existen.

Para el año 2030, se visualiza que la capacidad instalada en el país podría llegar a 400 MWt, lo que implicaría un incremento anual promedio de aproximado 33 MWt.

Dado que la tecnología de bombas de calor geotérmico tiene un costo de inversión inicial mayor que las tecnologías de climatización convencionales, se considera factible fomentar la fabricación nacional de estos equipos para abatir significativamente los costos. Mientras tanto el mercado potencial está más bien en la climatización de grandes espacios como naves industriales, escuelas, hoteles, hospitales y edificios de nueva creación. Para ello se requiere el apoyo de programas federales de estímulos e incentivos relativos a la eficiencia energética.

Adicionalmente, se visualiza la aplicación de las bombas de calor geotérmico en invernaderos, procesos de deshidratación, acuacultura y balneología, donde pueden obtenerse tasas de retorno atractivas, debido principalmente a que los beneficios económicos que se pueden obtener derivan del ahorro de energía.

IMAGEN 9 TUBERÍAS DE UN SISTEMA DE USOS DIRECTOS

FUENTE: https://lakecountrygeothermal.com

.

Implementación de la visión

Aun cuando la tecnología para el aprovechamiento de los UDCG es madura y se cuenta con cierta experiencia en el país, es necesario resolver algunos aspectos técnicos y no técnicos, que permitan alcanzar la visión.

A partir del análisis de las etapas genéricas para el desarrollo de proyectos de UDCG, que constan de identificación, exploración, diseño y construcción, así como de su operación y mantenimiento (Jóhannesson & Chatenay, 2014a), se determinaron una serie de acciones estratégicas de tipo técnico (retos tecnológicos) que se consideran prioritarias para llegar a la meta de 3800 MWt de capacidad instalada hacia el año 2030.

Para fines prácticos, en este mapa de ruta se considera un reto a la acción enfocada en resolver una problemática relevante que limita el cumplimiento de la visión. El reto considera aspectos relacionados principalmente con cuestiones técnicas, entre las que se encuentran procesos de trabajo (estándares, metodologías, técnicas), infraestructura y herramientas (software, bases de información, mejores prácticas, estándares, entre otros).

Dada la madurez de la tecnología, las capacidades técnicas disponibles en el país y la abundancia de recursos geotérmicos, en este mapa de ruta predominan las acciones habilitadoras que buscan promover el crecimiento del mercado de usos directos. Para ello debe facilitarse la gestión de proyectos de usos directos, aprovechar los programas económicos existentes para el uso de energías renovables, implementar nuevos modelos de negocio, mejorar la rentabilidad de los proyectos, e incluir a la sociedad a través de diferentes esquemas y mecanismos, es decir, ya sea como usuarios, proveedores, o como empleados.

Por otra parte, las acciones estratégicas enfocadas en aspectos técnicos buscan facilitar la ejecución de los proyectos, mejorar su rentabilidad y garantizar el desempeño de las instalaciones de UDCG a fin de coadyuvar en el desarrollo del mercado.

Un factor de éxito clave en la implementación del mapa de ruta es el involucramiento de los actores relevantes para la ejecución de las acciones propuestas. En este sentido se identificaron tres grupos cuya participación es medular. Por una parte están los organismos del gobierno integrados principalmente por SENER, SE, CONAGUA, SAGARPA, CONACYT y FIDE, cuyas tareas principales están relacionadas con el fortalecimiento de un marco legal que impulse el crecimiento de la industria, la generación de capacidades nacionales y la implementación de políticas públicas y agendas sectoriales que incluyan a los usos directos.

En un segundo grupo se encuentra la CoIDT+i que está integrada por las instituciones de educación superior, los centros e institutos de investigación y desarrollo tecnológico, tanto públicos como privados del país, incluyendo al CEMIE-Geo. El rol de la CoIDT+i se centra en generar soluciones a los problemas reales de la industria a través de la ejecución de actividades de innovación y desarrollo tecnológico, así como en generar capacidades tecnológicas y formar recursos humanos para mejorar el aprovechamiento del recurso geotérmico.

Finalmente, en el tercer grupo se encuentra la industria, integrada por fabricantes, desarrolladores, firmas de ingeniería y empresas de servicios, de quienes se esperan inversiones, uso de la tecnología, así como la aplicación de las soluciones propuestas por la CoIDT+i.

En las siguientes secciones se describen con mayor detalle las acciones estratégicas que corresponden con los retos tecnológicos prioritarios identificados y las acciones habilitadoras para mitigar las barreras de tipo social, ambiental, económico y regulatorio, que en conjunto se consideran las de mayor relevancia para alcanzar las metas planteadas para el año 2030.

I. Acciones estratégicas para fortalecer el desarrollo de la industria: Retos tecnológicos

Durante el análisis de las acciones estratégicas propuestas para atender las aplicaciones en cascada y otras aplicaciones, se observaron semejanzas importantes tanto en su problemática, como en las actividades propuestas para su solución, por lo cual, se agruparon y se presentan consolidadas bajo la categoría: *aplicaciones de usos directos del calor geotérmico.* Mientras que las acciones estratégicas asociadas a las bombas de calor geotérmico presentan problemáticas y soluciones específicas por lo que se presentan en un apartado diferente.

En términos generales, las acciones que a continuación se describen buscan generar información actualizada y específica que facilite la planeación, evaluación y desarrollo de proyectos de UDCG; disminuir costos de instalación y operación; establecer proyectos económicamente viables por regiones del país, así como garantizar el desempeño y calidad de las instalaciones.

En la Tabla 8 se presentan tales acciones estratégicas.

TABLA 8. ACCIONES ESTRATÉGICAS PRIORITARIAS PARA ALCANZAR LA VISIÓN AL AÑO 2030

Aplicaciones de usos directos del calor geotérmico
Complementar los sistemas de información existentes sobre energías limpias
Identificar sitios potenciales donde confluye el recurso geotérmico con procesos industriales que involucren calor
Mejorar la rentabilidad de proyectos de UDCG
Garantizar la calidad en la implementación de las instalaciones de UDCG
Bombas de calor geotérmico
Desarrollar alternativas tecnológicas para disminuir los costos asociados a proyectos de bombas de calor geotérmico
Garantizar el desempeño y la calidad de los sistemas de bombas de calor geotérmico

Para implementar cada una de las acciones estratégicas se observan tres posibles estrategias genéricas a seguir, cuya selección toma en cuenta el tiempo esperado para su atención y la disponibilidad de capacidades técnicas nacionales. En este sentido, las estrategias que se consideran son las siguientes:

- Desarrollo a partir de capacidades nacionales es decir, con la participación de entidades y especialistas del país.
- Desarrollo en colaboración con entidades del ámbito internacional.
- Implementación de soluciones o tecnologías existentes.

La primera de las estrategias implica que existen las capacidades técnicas a nivel nacional para atender el reto. La segunda se refiere a situaciones en las que algunas de las capacidades o elementos clave para el reto están siendo o podrían ser solventadas por instituciones del ámbito internacional. Finalmente, la tercera estrategia es aplicable en situaciones en las que se dispone de un tiempo muy corto para resolver el reto pero para las que ya existen soluciones o tecnologías que se pueden implementar.

I.a. Aplicaciones de usos directos del calor geotérmico

Las acciones estratégicas para uso del calor geotérmico en cascada y otras aplicaciones son transversales por lo que se agrupan en este apartado. En particular, las acciones estratégicas se orientan en generar y/o adecuar tanto herramientas, métodos y sistemas de información, como soluciones técnicas que apoyen la toma de decisiones en proyectos de usos directos, faciliten su ejecución, disminuyan costos y mejoren el desempeño de las instalaciones.

En la Tabla 9 se presenta un resumen de las acciones estratégicas consideradas prioritarias, así como el resultado esperado y la estrategia de atención respectiva.

TABLA 9. ACCIONES ESTRATÉGICAS PRIORITARIAS PARA LAS APLICACIONES DE USOS DIRECTOS DEL CALOR GEOTÉRMICO

Acción estratégica	*Resultado esperado*	*Estrategia*
Complementar los sistemas de información existentes sobre energías limpias	Sistemas de información con datos específicos que faciliten la planeación y ejecución de proyectos de UDCG	Desarrollo con capacidades técnicas nacionales
Identificar sitios potenciales donde confluye el recurso geotérmico con procesos industriales que involucren calor	Propuestas de proyectos técnica y económicamente viables por región	Desarrollo con capacidades técnicas nacionales

Acción estratégica	*Resultado esperado*	*Estrategia*
Mejorar la rentabilidad de los proyectos de UDCG	Soluciones tecnológicas que disminuyan los costos de operación y mantenimiento de proyectos de UDCG	Desarrollo con capacidades técnicas nacionales
Garantizar la calidad en la implementación de las instalaciones de UDCG	Estándares, buenas prácticas y guías para el desarrollo de proyectos de UDCG Herramientas que faciliten el desarrollo de proyectos	Desarrollo con capacidades técnicas nacionales y alianzas internacionales en temas puntuales

Dado que la tecnología es madura y existe el conocimiento en el país para la atención de estas acciones, la estrategia sugerida considera capacidades nacionales. Para obtener los mejores resultados en los plazos establecidos, se visualiza la necesidad de concretar alianzas estratégicas entre actores de los diferentes ámbitos (academia, industria y gobierno).

El detalle de cada una de las acciones estratégicas identificadas se presenta a continuación:

a) Complementar los sistemas de información existentes sobre energías limpias

El Gobierno Federal ha llevado a cabo iniciativas importantes para recopilar información sobre distintas energías renovables, incluyendo la geotermia, y ponerla a disposición del público en general, con el fin de apoyar el desarrollo de proyectos y su evaluación técnico-económica. En este sentido, existen sistemas oficiales de información que incluyen el estado de los recursos geotérmicos y su potencial, tales como el Inventario Nacional de Energías Limpias (INEL) [17] y el Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (AZEL), que han sido generados por la SENER con financiamiento del Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (FOTEASE). Adicionalmente, otras instituciones y empresas del país han recopilado datos y realizado estudios referentes a los recursos geotérmicos, en distintos momentos y con diversos enfoques y alcances, por ejemplo los estudios realizados por la CFE, el INEEL y la CONAGUA. No obstante, se considera que la información disponible requiere consolidarse, actualizarse y complementarse con datos geotérmicos específicos y actualizados, como son focos termales (manantiales, pozos, suelos calientes, fumarolas, etc.) al menos de la parte central del país. También deben incluirse otros datos de localización (coordenadas, municipios), acceso, tipo, gasto, temperatura, composición química, roca aflorante, entre otros. Disponer de estos detalles y datos actualizados facilitaría la toma de decisiones para la planeación, evaluación y desarrollo de proyectos de UDCG. Así, la información que poseen las instituciones y empresas del país sobre los recursos geotérmicos, es un insumo importante para complementar las herramientas existentes. Ejemplo de lo anterior, son los mapas interactivos de la CONAGUA, los cuales cuentan con módulos que permiten a los usuarios efectuar consultas de información geográfica por Internet en sus versiones virtuales.

Asimismo, el INEEL cuenta con diversos estudios geotérmicos que pueden emplearse para la integración de datos geotérmicos en los sistemas nacionales. Por último, la CFE posee información sobre las principales características de los fluidos que se generan en las plantas geotermoeléctricas, así como datos de los focos termales de México. Estos últimos son datos muy antiguos que deben actualizarse y completarse.

Adicionalmente, el CEMIE-Geo se encuentra realizando los siguientes proyectos que generarán información que también puede ser un insumo para complementar los sistemas de información nacionales:

- P01. Mapas de gradiente geotérmico y flujo de calor para la República Mexicana, centrado en la zona central (Eje Neovolcánico) y la zona del Pacífico.

- 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.

Por lo anterior, la acción estratégica que se propone se enfoca en complementar las herramientas de información que existen actualmente, como el INEL y el AZEL, para disponer de información específica, actualizada, consolidada y confiable sobre los recursos geotérmicos, generada a partir de la verificación o el levantamiento de

[17] Antes Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE).

datos en sitio, que permita establecer futuros proyectos de usos directos en el país.

En la tabla 10 se presentan las actividades prioritarias sugeridas para atender este reto, así como los periodos de atención y los actores clave.

TABLA 10. ACTIVIDADES PRIORITARIAS SUGERIDAS PARA COMPLEMENTAR LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN DE ENERGÍAS LIMPIAS EXISTENTES

Fecha de Inicio: 2019 Fecha de término: 2022 (después es permanente)

Acciones prioritarias sugeridas	*Periodo de atención*	*Participantes clave*
Consolidar la información existente de las diferentes instituciones y empresas	12 meses	SENER, CEMIE-Geo, CoIDT+i, CFE, CONAGUA
Realizar levantamiento de datos térmicos en sitio y complementarios	24 meses	CEMIE-Geo
Incorporar los datos recabados en los sistemas nacionales de información	18 meses	SENER, CEMIE-Geo
Implementar un programa de actualización de las herramientas de información nacional de energías limpias	Permanente	SENER, CEMIE-Geo

Como se muestra en la tabla, para atender el reto se proponen cuatro actividades: la primera consiste en concentrar la información existente de los recursos geotérmicos, que actualmente está dispersa entre diversas instituciones.

Posteriormente, se deberá realizar un análisis para identificar información faltante, a partir de la cual se efectuará la actualización correspondiente y el levantamiento de los datos requeridos para complementarla. Esta información podría integrarse en el Inventario Nacional de Energías Limpias (INEL), en el cual se relacionen los datos termales con información geográfica (topografía, vías de comunicación, actividades productivas, hidrografía, etc.) proveniente del INEGI.

Finalmente, se propone la implementación de un programa para la actualización del INEL que considere periodos de dos años.

Los actores cuya participación se considera clave para este reto son inicialmente la SENER y el CEMIE-Geo, siendo este último quien deberá coordinar las actividades y obtener los recursos económicos para la ejecución del proyecto en su fase inicial. También deberá buscar la colaboración de las diferentes instituciones que poseen información y que podría ser útil para la actualización del sistema.

Por otra parte, es importante asegurar la confiabilidad y actualización de los datos geotérmicos contenidos en los sistemas de información nacional, por lo que un factor clave está relacionado con el apoyo económico continuo para tal efecto.

Cabe hacer mención que actualmente el Gobierno Federal ha destinado recursos para que el INEL se convierta en una herramienta estratégica para la toma de decisiones en el sector de energías renovables.

Por las características de esta acción, la estrategia para su atención considera la participación de las capacidades técnicas disponibles a nivel nacional, y se estima que los primeros resultados se alcancen en el mediano plazo, aunque por su naturaleza tiene un carácter permanente.

b) Identificar sitios potenciales donde confluye el recurso geotérmico con procesos industriales que involucren calor

Actualmente se carece de información que reúna datos referentes a la ubicación y características de los recursos geotérmicos superficiales y los vincule con las necesidades de energía térmica de las empresas o

agroindustrias de cada región en la que identifican los recursos. Contar con este tipo de información facilitaría la identificación de oportunidades para incorporar los UDCG con las actividades productivas de cada región del país.

La acción estratégica que se propone a continuación se enfoca en identificar áreas de convergencia entre procesos industriales que demanden calor y recursos geotérmicos, donde sea técnica y económicamente viable la incorporación de los usos directos.

Como resultado de la ejecución de esta acción estratégica se esperan propuestas de proyectos de UDCG que sean afines con las actividades productivas de las diferentes regiones del país y atractivas para la industria o posibles inversionistas.

A continuación se presentan las actividades prioritarias que se sugieren realizar para atender la problemática descrita, así como los periodos de ejecución y los actores que se consideran clave en su atención.

TABLA 11. ACTIVIDADES PRIORITARIAS SUGERIDAS PARA IDENTIFICAR SITIOS POTENCIALES DONDE CONFLUYE EL RECURSO GEOTÉRMICO CON PROCESOS INDUSTRIALES QUE INVOLUCREN CALOR

Fecha de Inicio: 2019 Fecha de término: 2022 (después es permanente)

Actividades prioritarias sugeridas	*Periodo de atención*	*Participantes clave*
Caracterizar el recurso geotérmico e identificar sus posibles usos de acuerdo a la actividad productiva de cada región del país	24 meses	CEMIE-Geo, Industria, CONAGUA
Generar propuestas de proyectos de usos directos considerando los sitios factibles de acuerdo a la presencia de recursos geotérmicos y las actividades productivas de cada región	12 meses	SE, SEDESOL, SAGARPA, CoIDT+i, CEMIE-Geo,
Realizar estudios de factibilidad técnico-económica para seleccionar los proyectos más viables a ser desarrollados en cada región	12 meses	CEMIE-Geo
Difundir la cartera de propuestas de proyectos a la industria	Permanente	SENER, SE, CEMIE-Geo, Industria

Un insumo muy relevante que si bien no impide el comienzo de esta acción, pero que sí facilitaría su ejecución, es la información que se genere como resultado de la acción estratégica "Complementar los sistemas de información existente sobre energías limpias" descrito en el inciso (a) de esta sección.

Partiendo de lo anterior, se proponen cuatro actividades prioritarias por realizar. La primera consiste en caracterizar el recurso, a partir de la información disponible en los sistemas nacionales de información (INEL y AZEL), e identificar las aplicaciones de UDCG más factibles para cada una de las distintas regiones del país, en función de sus actividades productivas y el valor económico de los productos y los procesos industriales convencionales en los que puedan sustituirse combustibles fósiles por calor geotérmico.

Una vez identificadas las mejores opciones para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos en cada región, se propone generar propuestas de proyectos integrales que incluyan la rentabilidad del mismo, y los beneficios locales y regionales en términos económicos, sociales y ambientales. Estos proyectos deberán combinar las particularidades sociales, culturales y ambientales de la región así como incorporar a las comunidades en los proyectos, puesto que de acuerdo con las experiencias previas estas son un factor clave en el éxito de su ejecución.

Las propuestas de proyectos deberán incluir el análisis de los diseños y las configuraciones más favorables, como pueden ser las aplicaciones en cascada, las cuales, como se ha mencionado, suelen ser más rentables debido a que los gastos de operación se distribuyen entre las diferentes aplicaciones. Otra opción que se debe contemplar en el diseño es la posibilidad de utilizar proyectos híbridos, es decir, aquellos que combinan los UDCG con otra fuente de energía limpia.

Con relación a los impactos locales y regionales, se sugiere que las propuestas incluyan un análisis de los posibles beneficios y problemáticas locales, regionales y nacionales que los proyectos podrían impactar. Hay experiencias internaciones exitosas de implementación de proyectos geotérmicos que han beneficiado a los sectores agrícolas y alimentario. Un ejemplo es la implementación en Kenia de invernaderos y granjas de manera exitosa (Ole Nchoe, 2018) que hacen uso de los recursos geotérmicos.

En el país los proyectos de usos directos pueden contribuir a resolver problemáticas específicas en estos sectores. Por ejemplo la deshidratación puede apoyar a reducir la cantidad del alimento desperdiciado en el país, que se estima en 10 millones 431 mil toneladas al año, equivalentes al 37% de la producción. Entre los productos que pueden deshidratarse para no desaprovecharse se encuentran pescados y sardinas, mango, nopal, y guayaba. (Aviña, 2018). Al respecto es importante señalar que existe una experiencia exitosa del Grupo iiDEA, con un proyecto inicialmente apoyado por

el CEMIE-Geo, cuyo éxito derivó en el apoyo de una empresa privada de geotermia, donde se han incorporado los usos directos y se ha involucrado a la comunidad, lo cual ha derivado en la generación de empleos y el desarrollo económico de la región. Este caso podría tomarse como ejemplo y replicarse en otras regiones aprovechando la experiencia adquirida.

Los proyectos de usos directos también pueden ayudar a mitigar la problemática relacionada con los impactos del cambio climático. En las regiones donde se han dificultado las actividades agrícolas pueden instalarse invernaderos aprovechando los recursos geotérmicos o utilizando la tecnología de las bombas de calor geotérmico.

Posteriormente, se deberán realizar estudios de factibilidad técnico-económica a cada una de las propuestas de proyecto. Esta información será un elemento indispensable para seleccionar los proyectos más viables para promoverse entre los sectores productivos.

Para finalizar, se propone integrar una cartera que concentre las propuestas de los proyectos más viables, la cual se difundiría entre industriales, inversionistas, organismos gubernamentales locales e interesados, con el objetivo de obtener financiamiento para su implementación.

La estrategia para atender este reto consiste en utilizar capacidades nacionales y los actores clave son la SENER y el CEMIE-Geo, a quienes se visualiza como las entidades coordinadoras de las actividades propuestas. La SAGARPA y la SEDESOL se conciben como representantes de los sectores beneficiarios que podrían coadyuvar identificando las regiones y actividades económicas específicas en las que se emplearán los usos directos.

Las actividades para la solución del reto deben iniciarse de inmediato, en paralelo con la complementación de los sistemas nacionales de información de energías renovables, y se espera obtener resultados en el corto plazo, es decir cuatro años, manteniendo posteriormente una atención permanente de este reto.

c) Mejorar la rentabilidad de proyectos de usos directos del calor geotérmico

Uno de los factores que ha impedido el crecimiento del mercado de los UDCG es que estos proyectos no resultan rentables ni competitivos con relación a otros de energía convencional.

Algunas oportunidades que se identifican para superar este problema están asociadas a los costos operacionales y de mantenimiento, entre los que se encuentran: costos de limpieza de tuberías, equipos y otras instalaciones, repuestos, reparaciones, inspecciones, servicios no previstos, paros de equipo, monitoreo de sistemas, entre otros.

Este tipo de costos, junto con los ingresos esperados, son aspectos que deben considerarse desde las primeras fases del proyecto, como parte del análisis financiero, ya que resultan elementos indispensables para validar el modelo de negocio, y determinar la bancabilidad del proyecto.

IMAGEN 10 PRODUCTO DESHIDRATADO

FUENTE: Grupo iiDEA, UNAM

Los costos de operación y mantenimiento de las aplicaciones de usos directos del calor dependen esencialmente de las características del fluido, tipo de aplicación, tamaño y características específicas. Concretamente, uno de los principales problemas que presentan los equipos es la incrustación ocasionada por el depósito de minerales disueltos en la salmuera geotérmica, la cual contiene considerables concentraciones de sílice, lo que provoca una de las incrustaciones más comunes.

Cada sistema geotérmico tiene diferentes problemas de incrustación, debido a la distinta composición, cantidad y carácter físico del agua geotérmica.

Los depósitos de sílice pueden presentarse en líneas de inyección, tuberías y equipos, reduciendo el área (o diámetro) de transferencia de calor, impactando así en la eficiencia del sistema. Como consecuencia se incrementa la frecuencia de mantenimiento y por consiguiente sus costos.

De la ejecución de las acciones propuestas para atender este reto, se espera como resultado generar soluciones tecnológicas que disminuyan costos de operación y con ello, mejorar la rentabilidad de los proyectos, tanto los que se encuentran actualmente en operación, como los nuevos. Para estos últimos, se considera que los aspectos asociados con la operación y mantenimiento pueden anticiparse desde las fases de diseño.

Las actividades que se proponen como parte de esta acción se mencionan en la Tabla 12.

TABLA 12. ACTIVIDADES PRIORITARIAS SUGERIDAS PARA MEJORAR LA RENTABILIDAD DE LOS PROYECTOS DE USOS DIRECTOS DEL CALOR GEOTÉRMICO

Fecha de Inicio: 2019 Fecha de término: 2023

Actividades prioritarias sugeridas	*Periodo de atención*	*Participantes clave*
Identificar posibles problemas de operación y mantenimiento relacionados con las características de los fluidos	12 meses	CEMIE-Geo, Industria
Identificar soluciones tecnológicas para atender las problemáticas de operación y mantenimiento prioritarias	12 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i, Industria
Realizar estudios de factibilidad técnico-económica para seleccionar las soluciones que contribuyan a incrementar la rentabilidad del proyecto	12 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i, Industria
Implementar las soluciones seleccionadas	24 meses	CoIDT+i, CEMIE-Geo, Industria

La atención de este reto comprende cuatro actividades prioritarias que se pueden realizar de manera independiente pero, cuyo resultado puede impactar en el resultado de otra.

La primera actividad tiene como objetivo compilar y completar la caracterización de los fluidos tanto de los nuevos proyectos como de los diferentes campos geotérmicos que actualmente están en operación, incluyendo el fluido residual caliente proveniente de las plantas geotermoeléctricas y que en el futuro puede ser aprovechada por aplicaciones de usos directos. Esta información es fundamental para identificar los problemas operativos y de mantenimiento que podrían presentarse con mayor frecuencia en las instalaciones de las aplicaciones y que impactan en su rentabilidad.

La segunda actividad consiste en proponer soluciones para los problemas identificados en la actividad anterior. Por un lado, se sugiere identificar soluciones similares y/o afines que ya hayan sido implementadas y puedan aplicarse en la industria geotérmica. Un ejemplo puede ser el conjunto de prácticas de industrias como la petrolera y minera, tanto nacional como internacional, en donde se presentan problemas similares. También se considera importante identificar soluciones que ya se encuentren disponibles en el mercado, como productos químicos, materiales, métodos, herramientas, asesorías, servicios tecnológicos entre otros, a fin de reducir los tiempos de respuesta. En otros casos, las soluciones deberán buscarse mediante actividades de desarrollo tecnológico.

De esta forma, el resultado de estas dos actividades será la caracterización de los fluidos de los sistemas y distintas soluciones tecnológicas tendientes a disminuir los costos de operación y mantenimiento de instalaciones de UDCG.

Esta información constituirá la base para realizar la tercera actividad que consiste en evaluar tanto técnica como económicamente cada una de las alternativas para solucionar los problemas de mayor impacto en la rentabilidad de los proyectos de UDCG. Asimismo, será de utilidad desde la etapa de planeación de los nuevos proyectos, ya que será una herramienta para determinar los materiales y equipos más adecuados para los sistemas, y con ello determinar la inversión y rentabilidad de los proyectos.

Por otra parte, la cuarta actividad consiste en implementar las soluciones mejor evaluadas para atender las distintas problemáticas identificadas en los sistemas de los actuales y futuros proyectos de usos directos y así incrementar su rentabilidad.

La implementación se llevará a cabo mediante un plan de trabajo que organice los recursos necesarios, incluyendo los económicos y humanos así como el tiempo requerido para atender los problemas identificados. La

implementación de las soluciones implica contratar servicios de asistencia técnica y consultorías, que bien pueden ser atendidas por el CEMIE-Geo así como otras organizaciones que cuenten con las capacidades necesarias en este rubro.

En general, las actividades propuestas pueden ser atendidas con capacidades nacionales, y se estima que se alcancen los primeros resultados en un periodo de cinco años. Se observa factible que estas actividades empiecen de inmediato puesto que se cuenta con información disponible.

Entre los actores clave que participan en la realización de las actividades se encuentran la CoIDT+i, el CEMIE-Geo y la industria.

d) Garantizar la calidad en la implementación de las instalaciones de UDCG

Uno de los riesgos de la implementación de instalaciones de usos directos, es que no se realice de manera adecuada y por consiguiente no tengan el desempeño y eficiencia esperada por los usuarios. Esto puede repercutir en altos costos o retrabajos, desmotivando a otros clientes potenciales.

Para reducir este riesgo se propone una acción estratégica enfocada en fortalecer las capacidades técnicas a nivel nacional para desarrollar las etapas que involucra la cadena de valor de los proyectos de usos directos y con ello dar mayor certeza a los clientes sobre la calidad y desempeño de esas instalaciones.

En la Tabla 13 se presentan las actividades propuestas para atender esta problemática.

TABLA 13. ACTIVIDADES PRIORITARIAS SUGERIDAS PARA GARANTIZAR LA CALIDAD EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS INSTALACIONES DE UDCG

Fecha de Inicio: 2019 Fecha de término: 2022

Actividades prioritarias sugeridas	*Periodo de atención*	*Participantes clave*
Desarrollar e implementar guías de mejores prácticas para el diseño y construcción de instalaciones de usos directos	24 meses	SENER, CEMIE-Geo, CONUEE, AGM, CONACYT
Desarrollar e implementar un programa de certificación de proveedores	4 años	SE, FIDE, CONUEE, AGM, CEMIE-Geo
Crear una plataforma de información que concentre las buenas prácticas y los proveedores confiables	12 meses	SENER, SE, CEMIE-Geo

La primera actividad propuesta consiste en desarrollar buenas prácticas o guías para implementación comercial y a gran escala de la tecnología, las cuales deberán cubrir las diferentes etapas de proyecto así como los elementos críticos en el diseño y construcción del mismo. Entre los temas que se propone incluir se encuentran los siguientes:

- Procedimientos de seguridad de perforación
- Eficiencia del equipo de perforación
- Estándares de terminación de pozo
- Protección del medio ambiente (protección del agua subterránea)
- Calidad de la terminación del intercambiador de calor del pozo
- Colectores e instalación de equipos de superficie

Se propone que las guías o buenas prácticas sean elaboradas por el CEMIE-Geo en conjunto con la Asociación Geotérmica Mexicana (AGM), con la participación de SENER y CONUEE para formalizar los documentos que se generen.

Por otro lado, la segunda actividad consiste en desarrollar un programa de certificación de proveedores para el diseño e instalación de proyectos de UDCG. Este programa deberá incluir proveedores de equipos, intercambiadores de calor, bombas, ductos, compresores, además de firmas de ingeniería con capacidades técnicas para realizar el proyecto en las etapas de ingeniería, procura y construcción (IPC). Los proveedores certificados podrían integrarse a este programa, o a otros como por ejemplo al programa Sello FIDE, que es un distintivo que se otorga a productos que inciden directa o indirectamente en el ahorro de energía eléctrica (FIDE, 2018).

Finalmente, se propone que esta información sea concentrada y difundida a través de una plataforma digital, que además contenga información referente a los trámites y regulación que deben cumplir los proyectos de usos directos. Esta plataforma tendrá que actualizarse periódicamente y estar vinculada con las páginas de las empresas proveedoras y con las entidades del gobierno a cargo de los procedimientos regulatorios para esta tecnología, como podrían ser la CONAGUA y SENER.

La estrategia propuesta considera sólo capacidades nacionales, requiriéndose la participación de actores de los ámbitos académico, industrial y gubernamental.

Esta acción estratégica está estrechamente relacionada y es complementaria con la acción del ámbito económico: "*Habilitar la cadena de suministro para el desarrollo de proyectos de usos directos del calor geotérmico*" que se presenta en la sección II.b, inciso c.

El inicio de las actividades propuestas se plantea para el año 2019 y los primeros resultados en el año 2020 con la finalización de la primera y tercera actividad.

I.b. Bombas de calor geotérmico

A pesar de que las bombas de calor geotérmico han tenido el mayor crecimiento de todas las aplicaciones de los usos directos en el mundo y que se emplean en alrededor de cuarenta y tres países, en México es una tecnología poco conocida y que no se ha implementado a nivel comercial, pero con un importante potencial, especialmente en regiones con climas extremos. Para lograr su competitividad en el mercado nacional, se requiere superar algunos aspectos técnicos que buscan reducir el costo de instalación y generar confianza en los posibles usuarios.

La Tabla 14 presenta el resumen de las acciones estratégicas identificadas y consideradas prioritarias, para lograr las metas de capacidad instalada al año 2030 en materia de bombas de calor geotérmico.

TABLA 14. ACCIONES ESTRATÉGICAS PRIORITARIAS PARA BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICO

Reto	Resultado esperado	Estrategia
Desarrollar alternativas tecnológicas para disminuir los costos asociados a proyectos de bombas de calor geotérmico	Componentes de las bombas de calor producidos nacionalmente Herramientas que faciliten del desarrollo de proyectos optimizando costos	Desarrollo con capacidades nacionales
Garantizar el desempeño y la calidad de los sistemas de bombas de calor geotérmico	Estándares de desempeño para el equipo de las bombas de calor Estándares de diseño e implementación de los sistemas de bombas de calor	Desarrollo con capacidades nacionales

A continuación se presenta el detalle de cada una de las acciones estratégicas identificadas:

a) Desarrollar alternativas tecnológicas para disminuir costos asociados a proyectos de bombas de calor geotérmico

En el país existen capacidades para el desarrollo de proyectos piloto de bombas de calor desde hace varios años. El INEEL y la UMSNH son las instituciones que han realizado la mayoría de estos esfuerzos. Recientemente, el CEMIE-Geo ha concentrado e integrado una parte importante las capacidades nacionales en esta materia y en la actualidad, está ejecutando proyectos para la implementación de prototipos de bombas de calor geotérmico y estudios de mercado. Como resultado de ello se han instalado 13 bombas de calor en cuatro proyectos demostrativos, con una capacidad total de 149.6 kWt.

Pese a estas capacidades, el mercado aún no se ha desarrollado por lo que se requiere que los proyectos trasciendan a una fase comercial. Sin embargo, su implementación presenta una importante desventaja frente a las tecnologías convencionales debido a los altos costos iniciales de instalación. Adicionalmente, se carece en el país de todas las capacidades técnicas para su implementación completa. Por ejemplo, actualmente las bombas de calor deben importarse del extranjero, situación que incrementa aún más los costos.

Una vertiente de esta problemática está relacionada con la instalación de la bomba de calor y del sistema asociado: diseño y cálculo del sistema a instalar, excavación de zanjas o pozos, colocación de ductos e intercambiadores de calor. Se han identificado altos costos en las diferentes actividades, particularmente en la excavación para colocar los intercambiadores de calor que requiere el sistema.

Las actividades propuestas buscan identificar oportunidades para implementar proyectos comerciales de bombas de calor geotérmico e identificar oportunidades para disminuir los costos asociados.

TABLA 15. ACTIVIDADES PRIORITARIAS SUGERIDAS PARA DESARROLLAR ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA DISMINUIR COSTOS ASOCIADOS A PROYECTOS DE BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICO

Fecha de Inicio: 2019 Fecha de término: 2022 (después es permanente)

Actividades prioritarias sugeridas	*Periodo de atención*	*Participantes clave*
Aplicar las capacidades tecnológicas existentes en el país para implementar proyectos comerciales de bombas de calor geotérmico	36 meses	CoIDT+i, CEMIE-Geo, CONACYT
Adaptar, asimilar o desarrollar herramientas que faciliten el diseño integral de proyectos con bombas de calor geotérmico	36 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i, firmas de ingeniería, CONACYT, CONUEE
Proponer soluciones tecnológicas para disminuir costos de instalación	24 meses	CoIDT+i, CONACYT, CONUEE

La primera actividad consiste en implementar un plan para aplicar las capacidades existentes en el país para proyectos comerciales de bombas de calor geotérmico. Para ello, se propone que los especialistas del CEMIE-Geo, por ser la red que concentra las capacidades nacionales de este tema, generen propuestas para la instalación de proyectos comerciales de bombas de calor que sean atractivas en términos de rentabilidad y beneficios para sectores como el hotelero. Estas propuestas deberán considerar hacer uso de los instrumentos financieros existentes como el PRESEMEH o el FIDE para su realización.

Es importante señalar que los resultados de los estudios de mercado realizados por el CEMIE-Geo serán un insumo importante para plantear los proyectos y como resultado de esta actividad se espera consolidar proyectos comerciales que sean implementados por la industria y de esta forma atraer inversionistas.

La segunda actividad se enfoca en desarrollar herramientas para las firmas de ingeniería, que faciliten el diseño integral de proyectos con bombas de calor geotérmico, las cuales pueden ser simuladores, u otro tipo de metodologías, que permitan optimizar los diseños, considerando materiales, configuraciones y equipos. También se deberán desarrollar herramientas que asocien el diseño a los costos y consideren los usos complementarios de las bombas de calor, como la producción de agua caliente. Dadas sus capacidades técnicas estas herramientas pueden ser desarrolladas por el CEMIE-Geo y ofrecerlas como servicios a las firmas de ingeniería e industria en general.

De manera paralela, se propone identificar soluciones tecnológicas para disminuir los costos asociados con la etapa de instalación de los proyectos de bombas de calor geotérmico y que sean implementadas en proyectos comerciales a través de servicios de consultoría o asistencia técnica al sector industrial. Se sugiere que esta actividad se realice a través de grupos multidisciplinarios

capaces de explorar diversas alternativas, por ejemplo: adaptación, asimilación, y desarrollo tecnológico de los diferentes componentes de los sistemas de las bombas de calor geotérmico o la producción nacional de componentes, una vez que exista la demanda. No se descarta que las propuestas incluyan soluciones no técnicas como la firma de acuerdos comerciales para disminuir los costos de importación de las bombas de calor.

Se propone que estas actividades sean realizadas por la CoIDT+i y pueden ser coordinadas técnicamente por CEMIE-Geo. También sería importante la participación de CONACYT y CONUEE para promover la iniciativa.

La estrategia identificada para atender este reto es el desarrollo con capacidades nacionales. Las actividades propuestas son independientes, por lo que se espera los primeros resultados en los próximos tres años.

b) Garantizar el desempeño y la calidad de los sistemas de bombas de calor geotérmico

Al igual que en el caso de las instalaciones de usos directos que se abordó en el apartado I.a. inciso d), los sistemas de bombas de calor también corren el riesgo de que su instalación sea deficiente y su desempeño no sea el esperado, lo que puede ocasionar desconfianza en la tecnología por parte de los usuarios.

Para atender esta problemática se propone una acción que involucra crear mecanismos que aseguren la calidad de las instalaciones de bombas de calor mediante su estandarización y la creación de infraestructura para la realización de pruebas de desempeño. Para ello, se propone trabajar en dos vertientes. La primera se centra en el equipo de la bomba de calor geotérmico en sí, y la segunda en el diseño e instalación del sistema, compuesto esencialmente por intercambiadores de calor, ductos y bombas para el desplazamiento del fluido de trabajo.

A continuación se presentan las actividades prioritarias sugeridas para atender esta problemática.

TABLA 16. ACTIVIDADES PRIORITARIAS SUGERIDAS PARA GARANTIZAR EL DESEMPEÑO Y LA CALIDAD DE LOS SISTEMAS DE BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICO

Fecha de Inicio: 2020 Fecha de término: 2023

Actividades prioritarias sugeridas	*Periodo de atención*	*Participantes clave*
Desarrollar estándares y normas para garantizar el desempeño de la bomba de calor geotérmico (dispositivo)	24 meses	EMA, CONUEE, CoIDT+i CEMIE-Geo, industria
Crear laboratorios de prueba para evaluar el desempeño de bombas de calor geotérmico	36 meses	CONUEE, CoIDT+i, CEMIE-Geo
Desarrollar estándares para el diseño e instalación de sistemas de bombas de calor geotérmico	24 meses	CEMIE-Geo, AGM, CoIDT+i

La primera actividad consiste en desarrollar estándares y la norma correspondiente para regular el desempeño del equipo de la bomba de calor. Se propone que la norma resultante sea una Norma Oficial Mexicana (NOM), de observancia obligatoria para los equipos que se instalen en México, ya sea que se fabriquen en el país o se importen.

Por otro lado, la segunda actividad consiste en crear laboratorios de prueba para verificar que el equipo que se comercializa cumple con esa norma. Para ello se podrían acreditar laboratorios de universidades y centros de investigación existentes o habilitar los laboratorios de prueba para dispositivos similares, por ejemplo de sistemas de refrigeración.

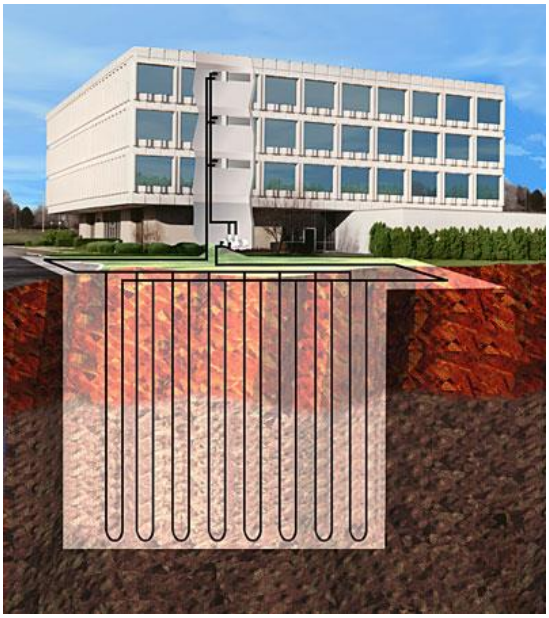
La tercera actividad se centra en desarrollar buenas prácticas y estándares que se adopten para el diseño e instalación de los sistemas de bombas de calor geotérmico. En este caso, entre los temas que se deberían incluir se encuentran los siguientes:

- Entrenamiento del personal para el diseño y la instalación
- Métodos de diseño y cumplimiento
- Prueba de conductividad térmica del suelo
- Materiales de tubería de intercambio de calor de tierra y unión

Al respecto, en el Reino Unido existe un tipo de normativa (GSHP Association, 2018), que podría adaptarse o tomarse como referencia para su aplicación en México. Los estándares podrían ser emitidos inicialmente por el CEMIE-Geo o la AGM, y posteriormente podrían convertirse en una norma nacional voluntaria.

Para superar este reto se plantea como estrategia el desarrollo a través de capacidades disponibles a nivel nacional y se espera tener los primeros estándares en los próximos dos años.

IMAGEN 11 INSTALACIÓN COMERCIAL DE USOS DIRECTOS DEL CALOR



FUENTE: http://thnktnk.net

II. Acciones habilitadoras para el desarrollo del mercado de usos directos del calor geotérmico

Un aspecto fundamental para facilitar la implementación de las acciones estratégicas presentadas, es la definición de acciones habilitadoras orientadas a solucionar las principales barreras identificadas. En términos generales, las barreras se clasifican en cinco tipos:

- **Regulatorias:** barreras relacionadas con los aspectos de política tecnológica, energética e industrial; instrumentos legales; administración de permisos de uso y explotación de recursos naturales y manifestación de impacto ambiental.

- **Económicas:** estas incluyen aspectos de mercado, financiamiento, inversiones, así como la existencia y disposición de actores relevantes, clientes y proveedores, inversionistas e instituciones de financiamiento necesarios para facilitar este tipo de proyectos energéticos.

- **Recursos Humanos**: consideran aspectos relacionados con la disponibilidad, suficiencia y especialización de personal técnico y profesionista para soportar las actividades de la cadena de valor.

- **Sociales:** este tipo de barreras considera el impacto potencial del desarrollo de proyectos en las comunidades y la participación de la sociedad en general. Por ejemplo, las barreras comprenden aspectos relacionados con la participación de comunidad en la toma de decisiones, disposición a utilizar la energía renovable, por citar algunos.

- **Ambientales:** consideran los impactos potenciales de la tecnología en relación al uso de la tierra, ecosistemas naturales, áreas naturales protegidas, activos históricos y culturales. Algunas veces estos impactos pueden constituir el mayor conflicto con otros intereses.

Debido a la madurez de la tecnología de usos directos y el incipiente desarrollo del mercado en el país, en este mapa de ruta se identificaron una serie de barreras correspondientes a las cinco categorías mencionadas, cuya atención se considera clave para alcanzar la visión propuesta. A continuación se describen cada una de ellas así como las acciones habilitadoras propuestas para mitigarlas.

TABLA 17. BARRERAS PARA EL DESARROLLO DE LOS USOS DIRECTOS DEL CALOR GEOTÉRMICO Y ACCIONES HABILITADORAS SUGERIDAS PARA MITIGARLAS

Ámbito	*Barrera*	*Acción habilitadora*
Regulatorio	Limitaciones en el marco regulatorio actual para el desarrollo de los UDCG	Difundir y mejorar el marco regulatorio para el aprovechamiento de los UDCG
Económico	Inexistencia del mercado de aplicaciones de UDCG	Fomentar el desarrollo del mercado de UDCG mediante proyectos demostrativos con nuevos esquemas de negocio
		Identificar y fortalecer la infraestructura de soporte para los usos directos del calor geotérmico
		Habilitar la cadena de suministro para el desarrollo de proyectos de usos directos del calor geotérmico
Recursos humanos	Falta de especialistas para el desarrollo de proyectos de UDCG	Incrementar los recursos humanos especializados para los proyectos de UDCG
Social	Desconocimiento de la tecnología por parte de los clientes potenciales Desvinculación de las comunidades con la ejecución de proyectos geotérmicos	Implementar estrategias de comunicación y difusión de las tecnologías de aprovechamiento de los UDCG

Ámbito	*Barrera*	*Acción habilitadora*
Ambiental	Impacto ambiental debido a posible interacción del fluido termal con acuíferos utilizados para uso doméstico o agrícola	Implementar procedimientos para el control volumétrico del fluido geotérmico en función de su composición química y su disposición en el subsuelo

II.a. Ámbito Regulatorio

El aprovechamiento de los recursos geotérmicos en México está normado fundamentalmente por las siguientes Leyes y Reglamentos: Ley de Transición Energética (DOF, 2015); Ley de Energía Geotérmica (DOF, 2014a); Reglamento de la Ley de Energía Geotérmica (DOF, 2014b); Ley de Aguas Nacionales (DOF, 2016) y Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales (DOF, 2014c).

Por su parte, la Ley de Energía Geotérmica (LEG) tiene como propósito regular las actividades de reconocimiento, exploración y explotación de estos recursos (Santoyo *et al;* 2016), mientras la Ley de Aguas Nacionales (LAN) regula el uso, explotación y aprovechamiento de aguas nacionales, así como la preservación de su cantidad y calidad. La LEG establece que los titulares de permisos de exploración geotérmica deberán informar a la SENER si durante los trabajos de exploración detectan que existe interferencia entre el yacimiento geotérmico y los acuíferos adyacentes, presentando evidencia documental y de campo. En caso de que exista esta interferencia, el asunto se someterá a dictamen de la Comisión Nacional del Agua y con base en los resultados, la SENER resolverá la conveniencia de continuar los trabajos de exploración.

Por otra parte, en la LAN se establece que las aguas del subsuelo contenidas en yacimientos geotérmicos hidrotermales requieren de concesión por parte de CONAGUA, y si se demuestra que el yacimiento no tiene conexión hidráulica directa con los acuíferos adyacentes, la concesión no estará sujeta a la disponibilidad de agua de los acuíferos ni a la normatividad relativa a las zonas reglamentadas, vedas y reservas, respectivas. Para el caso de aguas diferentes al agua geotérmica (temperaturas menores a 80°C) no aplica esta excepción, y se estará en lo dispuesto en la LAN.

Con relación a los UDCG, el reglamento de la LEG en su artículo 2, los define como usos diversos, haciendo referencia a aquellos en los que se puede aprovechar la energía geotérmica en forma diferente a la generación de energía eléctrica y enuncia algunos, 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 o por absorción con amoníaco, extracción de sustancias químicas, destilación de agua dulce, recuperación de metales, evaporación de soluciones concentradas. No se mencionan específicamente las bombas de calor geotérmico, pero se interpreta que quedan contenidas en la calefacción urbana.

En general, la normatividad publicada a la fecha cubre los aspectos más importantes para la ejecución de proyectos de energía geotérmica. Sin embargo, desde la perspectiva técnica se considera que hay temas específicos de proyectos de UDCG que deben aclararse en la normatividad y detallarse para promover y facilitar su ejecución. Por ejemplo, lo referente a las bombas de calor, la forma en que se debe comprobar que no hay interferencia con acuíferos adyacentes al yacimiento geotérmico [18], el aprovechamiento tanto del agua geotérmica como de aguas calientes con temperaturas menores de 80°C, así como especificar si los proyectos de usos directos deben cumplir con todos los procedimientos y requisitos que se establecen para generación eléctrica y los controles necesarios para dar certeza de que el aprovechamiento del recurso es sustentable.

Actualmente la CONAGUA está elaborando los "Lineamientos de Geotermia en Materia de Aguas Nacionales" que establecen las disposiciones de carácter general y los requisitos en materia de protección y conservación de las aguas nacionales, que deberán cumplir los interesados en realizar actividades de exploración y explotación del recurso geotérmico. En este documento se enunciarán los estudios de

[18] Desde el punto de vista técnico, usualmente los yacimientos geotérmicos someros de temperaturas bajas e intermedias son parte de acuíferos no termales más regionales, por lo que sin duda existe conexión e interferencia entre ambos. Por tanto, más que establecer que debe probarse que no hay interferencia, lo cual normalmente es imposible, la normatividad debería considerar que la explotación de un yacimiento geotérmico no causará afectación ni interferirá con el o los acuíferos adyacentes contenidos en la misma unidad hidrogeológica, cuando el mismo volumen de fluido que se extraiga del yacimiento mediante uno o más pozos productores, se regrese a él mediante pozos inyectores, después de haber aprovechado su temperatura. Es decir, la explotación del yacimiento geotérmico mediante pozos productores no debería modificar significativamente ni la temperatura ni la salinidad, ni disminuir el volumen ni la capacidad de almacenamiento, del o los acuíferos adyacentes, aun cuando no exista una capa sello o barrera física que los separe.

exploración que en opinión de la autoridad se requieren para determinar la conexión o independencia hidráulica del yacimiento geotérmico con los acuíferos adyacentes o subyacentes.

Asimismo, la SENER está preparando los lineamientos que establecen el régimen de regulación para el aprovechamiento de la energía geotérmica para Usos Diversos y tienen por objeto promover e incentivar el desarrollo de estos proyectos, en términos de lo establecido en el artículo 52 de la Ley de Energía Geotérmica. Por ello, habrá que esperar su publicación para conocer los detalles de su contenido con relación a los aspectos aquí comentados.

Con el objetivo de reforzar el conocimiento del marco regulatorio vigente para los proyectos de UDCG a los miembros de la CoIDT+i, la industria y usuarios potenciales, se propone la siguiente acción habilitadora:

- Difundir y mejorar el marco regulatorio para el aprovechamiento de los UDCG.

A continuación se presentan con mayor detalle las acciones propuestas para su atención.

a) Difundir y mejorar el marco regulatorio para el aprovechamiento de los UDCG

Esta actividad tiene como propósito dar a conocer a todos los involucrados en la ejecución de proyectos de UDCG (compañías de servicios, desarrolladores, usuarios potenciales, academia, proveedores, entre otros) la normatividad vigente incluyendo leyes, reglamentos, lineamientos, mecanismos y procedimientos de gestión de proyectos para la obtención de permisos. Para ello se considera muy importante continuar con su difusión a través de distintos medios y mecanismos que se consideren adecuados para que la información llegue al público objetivo.

En la Tabla 18 se presentan los detalles de la actividad de difusión que se sugiere realizar.

TABLA 18. ACTIVIDADES PRIORITARIAS PARA DIFUNDIR EL MARCO REGULATORIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS UDCG

Fecha de inicio: 2018 Fecha de término: 2023 (después es permanente)

Actividades prioritarias sugeridas	*Periodo de atención*	*Participantes clave*
Difundir y mejorar la normatividad vigente aplicable a los UDCG y las acciones que se realizan en el tema para la mejora de su regulación	Permanente	SENER, CONAGUA, CoIDT+i, Industria

Los actores que se consideran relevantes para la coordinación e implementación de esta actividad de difusión son SENER y CONAGUA, apoyados por los miembros de la CoIDT+i, en específico el CEMIE-Geo y la industria, integrada principalmente por desarrolladores, empresas de servicios y proveedores.

Se considera que esta es una acción que debe ser permanente en el tiempo; no obstante en el corto y mediano plazo se requiere un esfuerzo intensivo.

II.b. Ámbito Económico

Uno de los factores clave de éxito para detonar el mercado de los usos directos en el país es consolidar un modelo de negocio que logre atraer inversiones al sector. Esto implica una acción coordinada entre gobierno, CoIDT+i, desarrolladores de proyectos, desarrolladores de vivienda, comunidad en general, así como empresas que participan en la cadena de suministro.

Una problemática importante que se ha identificado en México es el escaso interés por parte de constructores e industriales por implementar aplicaciones de usos directos del calor, debido en parte al desconocimiento de esta tecnología, pero también a los altos costos iniciales y la falta de incentivos.

Cabe recordar que a pesar de que en el país se han desarrollado diversos proyectos demostrativos de usos directos, no han logrado tener un impacto significativo para el desarrollo del mercado. Una de las razones es la falta de un modelo de negocio viable que correlacione la propuesta de valor de la tecnología y las necesidades del mercado.

Con base en lo anterior, se identificaron tres acciones habilitadoras orientadas a establecer una estrategia para impulsar el mercado de UDCG de nuestro país.

- Fomentar el desarrollo del mercado de UDCG mediante proyectos demostrativos con nuevos esquemas de negocio.
- Identificar y fortalecer la infraestructura de soporte para los UDCG.
- Habilitar la cadena de suministro para el desarrollo de proyectos de UDCG.

A continuación se presenta la descripción de la problemática y el plan general de acción para atender cada una de ellas.

a) Fomentar el desarrollo del mercado de UDCG mediante proyectos demostrativos con nuevos esquemas de negocio

En México ya se han desarrollado proyectos demostrativos por parte de la CFE en la década de 1980, que probaron la viabilidad técnica de algunas aplicaciones en cascada para secado de madera, climatización de invernaderos y espacios y deshidratación de alimentos.

En 2017 el Grupo iiDEA del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en coordinación con Grupo Dragón, implementaron otro proyecto demostrativo exitoso de aplicación de usos directos. En este, además de probar la viabilidad técnica, se incorporó una visión de negocio. Este proyecto, que tuvo su origen en uno de los proyectos del CEMIE-Geo, está enfocado en la deshidratación de alimentos e implicó identificar el mercado, generar acuerdos con empresas de otros sectores para ofrecer en conjunto productos de mayor valor agregado al consumidor final, además de integrar a las comunidades, sea como empleados en las instalaciones o como proveedores de los productos agrícolas.

Sin embargo, los proyectos demostrativos desarrollados en el país aún no han logrado pasar a la etapa comercial e industrial que demuestre los beneficios de esta tecnología.

En lo que respecta a financiamiento, en México se han creado instrumentos económicos cuyo propósito es promover la eficiencia energética y el uso de energías

limpias y renovables como son los casos del PRESEMEH y el Eco-crédito empresarial, que son coordinados por SENER y el FIDE. Estos instrumentos son una opción de acceso a financiamiento para los proyectos de UDCG, que aun cuando están disponibles y en operación, no han sido aprovechados, debido en gran parte a su desconocimiento en el sector de energía geotérmica.

Considerando lo anterior, a continuación se presentan una serie de actividades que tienen como objetivo fomentar la inversión para desarrollar el mercado de los usos directos.

TABLA 19. ACTIVIDADES PRIORITARIAS SUGERIDAS PARA FOMENTAR EL DESARROLLO DEL MERCADO DE UDCG MEDIANTE PROYECTOS DEMOSTRATIVOS CON NUEVOS ESQUEMAS DE NEGOCIO

Fecha de inicio: 2019 Fecha de término: 2023 (después es permanente)

Actividades prioritarias sugeridas	*Periodo de atención*	*Participantes clave*
Difundir los instrumentos de financiamiento existentes que pueden emplearse en proyectos de UDCG	12 meses	SENER, FIDE, CONACYT
Implementar proyectos demostrativos de bombas de calor utilizando instrumentos financieros existentes	24 meses	SENER, CEMIE-Geo, FIDE, firmas de ingeniería
Desarrollar el modelo de negocio que demuestre la viabilidad técnica financiera del proyecto a clientes potenciales	24 meses	CEMIE-Geo, FSE, FIDE, firmas de ingeniería
Difundir los resultados de los proyectos para atraer inversionistas y usuarios	Permanente	CEMIE-Geo, FSE, SENER, FIDE

La primera actividad se orienta a difundir los instrumentos de financiamiento en materia de energías limpias, que podrían aplicarse a proyectos de UDCG, entre los actores clave del sector se encuentran la CoIDT+i, las firmas de ingeniería, empresas con potencial de fabricación de componentes para las diferentes aplicaciones y clientes potenciales. La difusión puede llevarse a cabo a través de talleres o foros impartidos por representantes de la SENER, con apoyo del FIDE y el CONACYT. Derivado de esta acción se espera que los diferentes actores adquieran la información y elementos para aprovechar los incentivos y mecanismos de financiamiento que ya existen a la fecha. Se considera que esta actividad debe iniciarse de inmediato.

La segunda actividad consiste en implementar proyectos demostrativos de bombas de calor utilizando los instrumentos financieros existentes como el Eco-Crédito Empresarial y PRESEMEH o incluso el Premio PRODETES[19].

El Eco-Crédito es un programa de cobertura nacional, implementado por el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) diseñado para apoyar al sector empresarial y productivo nacional mediante financiamientos preferenciales, para la sustitución de equipos obsoletos por otros de alta eficiencia energética y utilizando energías limpias. Con ello se pretende disminuir costos de operación, el consumo agregado de energía eléctrica del país y generar un impacto positivo en el medio ambiente, al reducir la emisión de Gases de Efecto Invernadero (FIDE, 2014).

Por otra parte, el programa Eficiencia y Sustentabilidad Energética en Municipios, Escuelas y Hospitales (PRESEMEH) es de alcance nacional y se enfoca en eficiencia energética (EE)[20]. Tiene como objetivo desarrollar e implementar mecanismos operativos y financieros sostenibles para inversiones de eficiencia energética en municipios de México con el fin de reducir su consumo de energía (BM-SENER, 2017). La ejecución e implementación del PRESEMEH corre a cargo de la SENER con apoyo del FIDE y otras instituciones nacionales. Además, el programa cuenta con apoyo financiero complementario proveniente del Banco Mundial.

Los tipos de proyectos que financia el PRESEMEH son: 1) alumbrado público, 2) EE en proceso de abastecimiento de agua y saneamiento; 3) medidas de EE en edificios públicos, incluyendo aquellos de los sectores salud y educativo, como la iluminación eficiente y aislamientos térmicos, entre otros (BM-SENER, 2017).

Para la implementación de este tipo de proyectos es necesario en primer lugar, el acercamiento entre las instancias que otorgan el financiamiento, en este caso el FIDE y las organizaciones interesadas en aplicarlos como puede ser el CEMIE-Geo, para determinar en conjunto, las necesidades específicas de financiamiento que requieren los proyectos de bombas de calor y establecer los mecanismos de acceso correspondientes. La participación de SENER como coordinador de esta actividad es clave.

Entre los sectores identificados con potencial para la instalación de bombas de calor se encuentran el hotelero, hospitalario, educativo y el residencial (fraccionamientos). En este último caso podría ser necesaria la generación de alianzas con instituciones de crédito hipotecario del sector (por ejemplo FOVISSSTE e INFONAVIT).

Los resultados de la acción estratégica “Identificar sitios potenciales donde confluye el recurso geotérmico con procesos industriales que involucren calor”, y del proyecto del CEMIE-Geo relativo a Bombas de Calor Geotérmico para acondicionamiento de espacios habitacionales y comerciales son insumos relevantes para la definición y selección de los proyectos a implementar.

A través de estos proyectos se espera promover los beneficios y características de la tecnología para el aprovechamiento de los usos directos del calor, específicamente de las bombas de calor, enfatizando sus tasas de retorno y mostrando su proceso de desarrollo. El principal objetivo de esta actividad es generar entornos reales en los que los usuarios potenciales puedan apreciar y evaluar los beneficios de las bombas de calor y otras aplicaciones de los usos directos, así como demostrar la factibilidad de implementación de proyectos a escala comercial para atraer la atención de inversionistas y usuarios finales.

[19] El Premio PRODETES impulsa la innovación en tecnologías de energía limpia que coadyuven a la disminución de GEI. Este premio es convocado anualmente por la SENER, con apoyo del Banco Mundial (BM) y el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) y busca descubrir y apoyar las mejores propuestas en el ámbito de las energías renovables, eficiencia energética y bio-energéticos, para el desarrollo sustentable de México (GEF-SENER, 2017). La convocatoria contempla dos esquemas de apoyo, el primero dirigido a proyectos que se encuentren en etapas de prueba de concepto y prototipo, y el segundo enfocado a la comercialización de nuevas tecnologías, vinculando los esfuerzos entre la academia y la industria.

[20] Se define como Eficiencia Energética toda acción que conlleve a una reducción económicamente viable de la cantidad de energía necesaria para satisfacer las necesidades energéticas de los servicios y bienes que requiere la sociedad, asegurando un nivel de calidad igual o superior y una disminución de los impactos ambientales negativos derivados de la generación, distribución y consumo de energía. Queda incluida dentro de esta definición la sustitución de fuentes no renovables de energía por fuentes renovables.

A partir de la experiencia que se adquiera en la implementación de los incentivos existentes en proyectos de usos directos, se podrán tener elementos para diseñar, en su caso, modificaciones a esos esquemas de financiamiento para que se adapten a las características de los proyectos de UDCG, y particularmente de las bombas de calor.

Asimismo, se podría considerar ampliar el alcance de las políticas públicas existentes, para incluir en los reglamentos de construcción un análisis o evaluación de alternativas para la climatización de edificaciones nuevas (escuelas, hospitales, naves industriales, oficinas, entre otras) mediante el uso de bombas de calor geotérmico.

La tercera actividad está orientada a desarrollar modelos de negocio y esquemas de comercialización específicos e innovadores para los UDCG y las BCG. Estos modelos de negocio deben ser específicos para cada proyecto en los que se logre un balance entre los beneficios económicos para los inversionistas, y los sociales para las comunidades. Algunos aspectos clave a considerar para plantear modelos de negocio acorde a las características de los proyectos de UDCG son los siguientes:

- Identificar los nichos de mercado donde podrían generar mayor valor los productos. Esto implica incluso establecer acuerdos con empresas de otros sectores para generar en conjunto productos con mayor valor agregado y soportar la diferenciación del negocio para hacerlo más competitivo con respecto a otras alternativas que involucran energías convencionales y otras renovables.

- Establecer configuraciones/arreglos de sistemas de UDCG que incrementen la rentabilidad de los proyectos. En específico, los usos en cascada tienen la ventaja de aumentar la rentabilidad, ya que los costos de inversión, operación y mantenimiento se distribuyen entre las diferentes aplicaciones, incrementando el aprovechamiento de la energía y el rendimiento del sistema.

- Desarrollar canales específicos de distribución de los productos, por lo cual es necesario considerar estrategias de comercialización para que lleguen al mercado de manera efectiva.

- Plantear mecanismos de integración de las comunidades a los proyectos, ya sea como como socios, empleados, proveedores de insumos, etc.

Finalmente, la cuarta actividad plantea la difusión de los resultados de los proyectos demostrativos y los modelos de negocio a inversionistas y usuarios potenciales. Se sugiere que esto se lleve a cabo en eventos regionales en los que participen industriales, público en general, gobiernos estatales y municipales.

Las actividades uno y dos se pueden ejecutar en paralelo. Una vez concluidas, se ejecutaría la tercera actividad.

Los actores clave para llevar a cabo esta acción son el FIDE, el FSE y la SENER como promotores de los proyectos, y entidades como el CEMIE-Geo en colaboración con firmas de ingeniería como los desarrolladores y ejecutores. Se estima que los primeros resultados se obtengan en cuatro años; sin embargo, la promoción de los beneficios de la tecnología tiene un carácter permanente.

b) Identificar y fortalecer la infraestructura de soporte para los usos directos del calor geotérmico

Como se ha mencionado, un aspecto relevante durante la etapa de planeación de un proyecto de UDCG es identificar las zonas factibles donde desarrollarlos. Para ello es importante valorar la existencia de infraestructura que permitiría que el proyecto sea exitoso, tales como vías de comunicación terrestres, aéreas y marítimas, que son necesarias para transportar los productos y la materia prima, así como la disponibilidad de agua, telecomunicaciones, acceso a combustibles y electricidad, entre otras.

El resultado esperado de esta acción es contar con información que permita realizar correctamente el análisis técnico-económico que incluya los costos de transportación de los productos, el modelo de negocio y la planeación general de los proyectos de UDCG.

Adicionalmente, una vez que exista la demanda y el consiguiente mercado, se espera que los gobiernos de los lugares donde existe el recurso geotérmico incluyan en sus planes de desarrollo municipales y regionales el desarrollo de la infraestructura que dé soporte a los futuros proyectos geotérmicos.

Las actividades sugeridas para generar la estrategia mencionada se presentan en la Tabla 20.

TABLA 20. ACTIVIDADES PRIORITARIAS SUGERIDAS PARA IDENTIFICAR Y FORTALECER LA INFRAESTRUCTURA DE SOPORTE PARA LOS USOS DIRECTOS DEL CALOR GEOTÉRMICO

Fecha de Inicio: 2020 Fecha de término: 2023 (después es permanente)

Actividades prioritarias sugeridas	*Periodo de atención*	*Participantes clave*
Determinar el estado de la infraestructura soporte para el desarrollo de proyectos de usos directos	12 meses Después de manera permanente	CEMIE-Geo, gobiernos estatales, municipales e industria
Identificar los sitios con la infraestructura de soporte adecuada para el desarrollo de proyectos de UDCG	12 meses	CEMIE-Geo, gobiernos estatales, municipales e industria
Fortalecer la infraestructura de soporte para la realización de nuevos proyectos	4 años Después de manera permanente	Gobiernos municipales y estatales

Cabe señalar que esta acción habilitadora es complementaria a la presentada en la sección “Identificar sitios potenciales donde confluye el recurso geotérmico con procesos industriales que involucren calor”. Por ello, las tres actividades de esta sección parten de las propuestas de proyectos descritas en la sección anterior.

De tal manera, la primera actividad consiste en determinar el estado de la infraestructura de soporte existente en los lugares donde es factible incorporar aplicaciones de UDCG a procesos industriales. Este diagnóstico deberá considerar todos los requerimientos de infraestructura y servicios auxiliares para la correcta operación del proyecto y el transporte de productos, insumos o materia prima.

Posteriormente, con esta información se tendrán mayores elementos para determinar los sitios/áreas que son idóneas para la incorporación de instalaciones de usos directos.

Para estas dos acciones se visualizan como actores clave al CEMIE-Geo, los desarrolladores de proyectos, las firmas de ingeniería, los gobiernos estatales y municipales.

Finalmente, la tercera actividad está orientada a fortalecer la infraestructura de soporte existente en los lugares con potencial para desarrollar futuros proyectos de UDCG. Esta última actividad se espera ejecutarse en

el mediano plazo, una vez que el mercado esté más desarrollado.

Los actores involucrados en el desarrollo de estas actividades son los gobiernos municipales y estatales y el CEMIE-Geo.

Los primeros resultados de esta acción habilitadora se esperan en el año 2023, aunque sus actividades se observan como permanentes.

b) Habilitar la cadena de suministro para el desarrollo de proyectos de usos directos del calor geotérmico

El objetivo de esta acción estratégica es desarrollar la cadena de suministro en el país para garantizar que se puedan llevar a cabo todas las etapas que involucran los proyectos de usos directos, desde su diseño hasta su operación y mantenimiento.

Dado que el mercado no está desarrollado aún, no existe en el país esa cadena de suministro. Particularmente en el caso de bombas de calor, la mayoría de los componentes se importa de otros países, lo cual eleva el costo de su proveeduría. Además, hay muy pocas empresas mexicanas especializadas en proyectos de usos directos. En la medida que el mercado se desarrolle, se requerirá disponer de capacidades en el país para la proveeduría de componentes, así como llevar a cabo el diseño, construcción, operación y mantenimiento de este tipo de instalaciones.

Para atender esta problemática, se proponen tres actividades (Tabla 21) cuyo resultado esperado es la habilitación gradual de la cadena de suministro para proyectos de usos directos en el país, y con ello, garantizar la realización de todas las etapas consideradas en un proyecto de usos directos con las capacidades nacionales, reduciendo la dependencia tecnológica de otros países.

TABLA 21. ACTIVIDADES PRIORITARIAS SUGERIDAS PARA HABILITAR LA CADENA DE SUMINISTRO PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE USOS DIRECTOS DEL CALOR GEOTÉRMICO

Fecha de Inicio: 2019 Fecha de término: 2023

Actividades prioritarias sugeridas	*Periodo de atención*	*Participantes clave*
Identificar componentes clave de aplicaciones de usos directos, factibles de fabricarse nacionalmente	12 meses	SE, CEMIE-Geo, CoIDT+i
Impulsar la creación de empresas para el diseño, desarrollo y comercialización de soluciones tecnológicas para usos directos	5 años	SE, CONACYT, CEMIE-Geo, CoIDT+i, Industria
Crear una base de datos con información de consorcios y empresas desarrolladoras y de consultoría en usos directos	24 meses	SE, CEMIE-Geo, Industria

La primera actividad tiene como finalidad identificar materiales, componentes, sistemas y equipos asociados a proyectos de usos directos que sean estratégicos y que resulten viables de fabricar, adaptar o mejorar en el país.

Esta actividad requiere integrar grupos de trabajo multidisciplinarios para efectuar un mapeo de las capacidades actuales de la industria así como para determinar los componentes estratégicos en los que sea necesario y posible crear capacidades nacionales. El resultado esperado es un banco de información de componentes que puedan fabricarse o desarrollarse localmente y una estrategia para llevarla a cabo.

La segunda actividad está enfocada en impulsar la creación de empresas para la fabricación de esos componentes clave y su comercialización, así como fomentar la creación y/o reconversión de firmas de ingeniería para proporcionar servicios de asistencia técnica y consultoría técnica en UDCG. En este aspecto, es fundamental la vinculación entre los integrantes de la CoIDT+i y las empresas del sector para identificar áreas clave de interés, necesidades del sector y capacidades tecnológicas del país.

La tercera y última actividad consiste en crear una base de datos o directorio de fabricantes, proveedores de tecnología y componentes para las distintas aplicaciones de UDCG en el país, así como de empresas encargadas del diseño, instalación, operación y mantenimiento de esos proyectos. Por supuesto, esta base de datos deberá difundirse entre todos los involucrados, por lo que está alineada con la acción habilitadora relativa a la difusión de los beneficios del aprovechamiento de este tipo de tecnología. (Ver apartado II.d, inciso a).

Las actividades propuestas pueden ejecutarse en paralelo y se estima que los resultados se obtengan en cinco años. Entre los participantes clave se ubican la SENER, SE, cámaras industriales, CONACYT, CEMIE-Geo, Industria.

IMAGEN 12 PRUEBAS DE DESHIDRATACIÓN EN CAMPO

FUENTE: Grupo iiDEA, UNAM.

II.c. Recursos Humanos

El personal especializado es un elemento fundamental para el desarrollo del mercado. De acuerdo con Gutiérrez-Negrín (2015), a finales del año 2014, en el país existían alrededor de 900 personas con título universitario trabajando en actividades relacionadas con la geotermia [21], específicamente en el gobierno (principalmente la SENER), la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE, Universidades y Centros de Investigación (incluyendo el CEMIE-Geo) y empresas del sector privado.

En contraste, el gobierno mexicano a raíz de la reforma energética busca impulsar la formación de talento a través de diferentes iniciativas. Una ellas es justamente el CEMIE-Geo, que tiene como uno de sus objetivos el desarrollo de programas de formación de recursos humanos. Sin embargo, considerando las metas establecidas en este mapa de ruta, es necesario el fortalecimiento de estas actividades para que en los próximos años pueda contarse con una masa crítica de especialistas y técnicos para atender el mercado en usos directos.

Con base en esos antecedentes, se identificó la siguiente acción habilitadora:

- Incrementar los recursos humanos especializados en proyectos geotérmicos de usos directos

A continuación se presenta la descripción de la problemática y el plan de acción para atenderla.

a) Incrementar los recursos humanos especializados para los proyectos de UDCG

El Mapa de Ruta Tecnológica en Geotermia publicado en 2017 por la SENER, menciona que para lograr un desarrollo sostenible en materia de energía geotérmica se requerirá en los próximos años una participación importante de diversas especialidades, por lo que se hace necesario incrementar el número de especialistas tanto a nivel licenciatura como de posgrado, a fin de desarrollar capacidades para aprovechar el calor geotérmico. Asimismo, se plantea como un objetivo clave reforzar la formación de especialistas de alto nivel para la explotación de recursos geotérmicos (SENER-IMP, 2017).

Específicamente, este Mapa de Ruta Tecnológica, busca complementar y profundizar en el tema de desarrollo de talento en materia de UDCG, debido a que este mercado no se ha desarrollado en el país hasta la fecha, por lo cual las capacidades son incipientes.

Las actividades propuestas para incrementar el número de especialistas en temas de usos directos se muestran en la Tabla 22.

TABLA 22. ACTIVIDADES PRIORITARIAS SUGERIDAS PARA INCREMENTAR LOS RECURSOS HUMANOS ESPECIALIZADOS PARA LOS PROYECTOS DE UDCG

Fecha de Inicio: 2019 Fecha de término: 2024

Actividades prioritarias sugeridas	*Período de atención*	*Participantes clave*
Generar un diagnóstico de requerimientos de formación de recursos humanos en las distintas aplicaciones directas del calor geotérmico	12 meses	SEP, FSE, CONACYT, CEMIE-Geo, CoIDT+i, Industria
Desarrollar talento a nivel técnico, licenciatura y posgrado	5 años	SEP, FSE, CONACYT, CEMIE-Geo
Desarrollar estándares de competencia (para personal técnico y profesional)	36 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i, CONACYT, CONOCER, Industria, Colegios de Ingenieros, Entidades de certificación de competencias laborales

[21] No se identifican datos específicos para usos directos, se asume que están incluidos.

Actividades prioritarias sugeridas	*Período de atención*	*Participantes clave*
Desarrollar un Programa de Certificación para personal	36 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i, CONACYT, CONOCER, Industria, Colegios de Ingenieros, Entidades de certificación de competencias laborales

Para implementar esta acción se definieron cuatro actividades. La primera actividad es realizar la detección de necesidades de desarrollo de talento considerando los requerimientos en el mediano y largo plazo del mercado nacional de aplicaciones de UDCG. De acuerdo al mapa de ruta de geotermia publicado en 2017 (SENER-IMP, 2017), el diagnóstico de requerimientos debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Identificar las áreas de conocimiento en las que se requiere formar especialistas y técnicos para el desarrollo de proyectos y para su instalación, operación y mantenimiento.
- Identificar las Instituciones de Educación Superior y Centros de Investigación que tengan programas afines al desarrollo de recursos humanos en los temas requeridos, y además
- Identificar el tamaño de la demanda de la formación de recursos humanos en las áreas de interés.

Esta actividad permitirá identificar las áreas de necesidad de conocimiento tecnológico, instituciones (públicas, privadas, IES, Centros IDT y empresas) capaces de proporcionar el conocimiento requerido y la cantidad de recursos humanos que se requiere formar.

Se estima que esta actividad puede ejecutarse en un plazo de 12 meses y que debe ser coordinada por el CEMIE-Geo en colaboración con el CONACYT y apoyo del FSE. Estas entidades deberán mantener una visión integral de la problemática y de las soluciones, por lo que también es relevante incorporar a la industria para la realización de esta actividad.

La segunda actividad consiste en diseñar e implementar programas para desarrollo de talento a nivel técnico, licenciatura y posgrado que formen o habiliten a especialistas capaces de diseñar proyectos, realizar y/o supervisar la instalación, operación y mantenimiento de las aplicaciones de usos directos del calor geotérmico, sobre todo a nivel comercial e industrial.

A partir del diagnóstico generado se podría establecer un plan de formación de especialistas y técnicos con base en los requerimientos identificados. Algunas de las especialidades que se han identificado para considerarse como parte de los programas de desarrollo de talento en UDCG, se mencionan a continuación:

Licenciatura y posgrado:

- Geofísicos y geólogos especializados en geohidrología, geoquímica y otros procesos específicos de la geotermia.
- Ingenieros, físicos y químicos que se especialicen en sistemas termodinámicos para las distintas aplicaciones de UDCG.
- Especialistas en Gestión y Administración de Proyectos.
- Especialistas en Planeación de Proyectos que incluyan las etapas técnica, económica y comercialización.
- Ingeniería de proyectos que incluya diseño, construcción, arranque y acondicionamiento de equipos.
- Ingenieros agrónomos especializados en procesamiento de productos agropecuarios a través de aplicaciones de UDCG.
- Ingeniería industrial, mecánica, eléctrica, telecomunicaciones, mecatrónica, agrónomos, químicos, en diferentes temas relacionadas con sistemas y aplicaciones de UDCG.
- Especialistas en diseño y operación de software.
- Biólogos, ingenieros, bioquímicos, entre otros.

Nivel técnico y entrenamiento:

- Entrenamiento de operadores y especialistas para la puesta en marcha, operación, mantenimiento y desmantelamiento de sistemas y equipos.
- Técnicos en instalación de bombas de calor y otros equipos de usos directos.

- Operadores para perforación de pozos geotérmicos someros.

- Operadores para excavación de trincheras y pozos para instalación de intercambiadores de calor.

Adicionalmente es muy importante establecer programas de capacitación sobre temas técnicos relacionados con las distintas aplicaciones de usos directos dirigidos al personal de los órganos reguladores, a fin de asegurar la compresión de la problemática e implicaciones técnicas de la regulación y normatividad relacionada con la explotación de recursos geotérmicos para proyectos de UDCG.

Con respecto a la formación de especialistas a nivel posgrado, se propone promover programas interinstitucionales en geotermia, para conjuntar la fortaleza de cada institución participante en el programa, las cuales serían identificadas como resultado del diagnóstico mencionado.

Para desarrollar este tipo de programas educativos se propone que las sedes para impartir los diferentes programas sean Ensenada, BC, Morelia, Mich., la Ciudad de México y Querétaro, Qro., por ser las localidades donde se concentra la mayoría de las instituciones con programas afines al tema, y a la vez donde hay un buen potencial de usos geotérmicos directos.

Debido a la naturaleza dinámica de estos programas de formación, se requiere tener una adecuada coordinación entre las diferentes instituciones de educación superior, en cuanto al personal participante en los programas y la gestión de los recursos para movilidad docente.

Cabe mencionar que es fundamental vincular a la industria en los diferentes programas de formación de recursos humanos con la finalidad de asegurar que estos respondan a las necesidades del sector industrial.

La tercera actividad está enfocada en el desarrollo de estándares de competencia en distintas áreas de conocimiento y habilidades relacionados con los proyectos de usos directos. De inicio se identificó la necesidad de contar con estándares de competencia para operadores de perforación y para personal técnico que se dedique a la instalación, operación y mantenimiento de equipos y sistemas de UDCG. El beneficio de contar con estas certificaciones nacionales es que se adecuen a las condiciones del país y sean accesibles para los especialistas.

A nivel internacional, existen diferentes estándares de competencia relacionados con el tema. Por ejemplo, los capitulados de Estados Unidos y Canadá de la *International Ground Source Heat Pump Association* cuentan con programas de entrenamiento que incluyen certificaciones y pueden tomarse de referencia para el desarrollo de los estándares nacionales. Al respecto, la SENER ha establecido acciones tendientes a fomentar la oferta de programas de adiestramiento y certificación de competencias, impulsando la creación del Comité de Gestión por Competencias de Energía Renovable y Eficiencia Energética (CGCEREE), cuyo objetivo es promover la generación de capital humano calificado en energías renovables y eficiencia energética, mediante el desarrollo de estándares de competencia y la certificación del personal técnico. En México los estándares de competencia son avalados por el Consejo Nacional de Normalización y Certificación de Competencias Laborales (CONOCER).

Por último, la cuarta actividad tiene como objetivo implementar programas de certificación de los estándares de competencia con el fin de asegurar que los especialistas y técnicos involucrados en los proyectos ejecuten sus funciones con el nivel de desempeño requerido. La finalidad de la certificación es asegurar que la capacitación se traduzca en un certificado comprobable que profesionalice al sector y aumente el número de empleos y la competitividad del sector (CONOCER, 2010). El proceso de certificación implica desarrollar manuales, procedimientos, metodologías, lineamentos e instrumentos de evaluación alineados a los estándares de competencia.

Se propone que en primera instancia el CEMIE-Geo coordine tanto la generación de los estándares de competencia como el programa de certificación, con el apoyo de instituciones con experiencia en la elaboración de estándares y programas de certificación.

Las tres últimas actividades pueden ser ejecutadas en paralelo, requiriendo de la participación de SEP, CONOCER, industria, colegios de ingenieros, entidades de certificación de competencias laborales, CONACYT y el CEMIE-Geo. La duración estimada para la atención de esta acción habilitadora es de cinco años, considerando una solución de corto a mediano plazo.

II.d. Ámbito Social

Para desarrollar el mercado de los UDCG es necesario atraer el interés de inversionistas y posibles usuarios de la tecnología y con ello generar la demanda. Un medio para lograr este cometido es a través de la difusión de proyectos demostrativos exitosos entre este sector de la sociedad y la población en general. Para ello se propone la siguiente acción habilitadora:

- Implementar estrategias de comunicación y difusión de las tecnologías de aprovechamiento de los UDCG.

A continuación se describe la acción habilitadora y las actividades sugeridas para atenderla.

a) Implementar estrategias de comunicación y difusión de las tecnologías de aprovechamiento de los UDCG

Se considera importante sistematizar y difundir esta información entre los diferentes sectores que participan en el desarrollo de proyectos de UDCG, incluyendo a los clientes potenciales. Para ello debe implementarse una estrategia de comunicación permanente, dirigida a gobiernos, instituciones financieras, empresas y público en general. Las actividades sugeridas para desarrollar la acción habilitadora se presentan en la Tabla 23.

TABLA 23. ACCIONES PRIORITARIAS SUGERIDAS PARA IMPLEMENTAR ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN Y DIFUSIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO DE LOS UDCG

Fecha de inicio: 2019 Fecha de término: 2021 (después es permanente)

Actividades prioritarias sugeridas	*Periodo de atención*	*Participantes clave*
Implementar una campaña de divulgación de las características y ventajas de las aplicaciones de UDCG enfocada al público general	Permanente	SENER, CEMIE-Geo, CoIDT+i
Implementar una estrategia difusión de los UDCG enfocada a posibles usuarios y actores clave	18 a 24 meses Permanente	CEMIE-Geo, CoIDT+i, Industria
Documentar casos de éxito de aplicaciones de usos directos dirigido a desarrolladores y operadores de proyectos de UDCG	Permanente	SENER, CEMIE-Geo, CoIDT+i, CONUEE

Para esta acción habilitadora se proponen tres actividades. La primera es diseñar y llevar a cabo una estrategia de divulgación de las características y ventajas de la tecnología, enfocada hacia la sociedad. Esto hace necesario diseñar e implementar campañas para hacer extensiva la información a través de diversos medios de prensa escrita, radio, redes sociales e incluso televisión.

Por otro lado, la segunda actividad consiste en generar una estrategia pero en esta ocasión enfocada a los posibles usuarios y los actores clave para el desarrollo del mercado como inversionistas, cámaras empresariales, gobiernos municipales y estatales, así como clientes potenciales de la tecnología, banca de desarrollo y comercial. Para ello se contempla utilizar medios directos, por ejemplo: foros, talleres y eventos, en donde se comparta información técnica, económica, ambiental y se incluya la divulgación de casos de éxito, como se menciona en la tercera actividad.

SENER, a través del PRESEMEH, ha impulsado iniciativas para promover proyectos demostrativos a fin de que puedan ser visitados por interesados en desarrollar este tipo de proyectos y por inversionistas, y que estos conozcan de forma directa y detallada los proyectos y los beneficios del uso de la tecnología.

Finalmente, la tercera actividad consiste en documentar aspectos técnicos de los casos de éxito de implementación de las aplicaciones de usos directos, y difundirlos entre desarrolladores de proyectos y clientes potenciales. La información debe incluir reportes de monitoreo de los sistemas instalados y la energía generada, estudios, artículos científicos y material de apoyo para clientes potenciales.

Como parte de esta actividad es importante difundir información del ámbito regulatorio, relacionada con la explotación de recursos geotérmicos y el desarrollo de proyectos de usos directos.

Las tres actividades propuestas se pueden desarrollar de manera simultánea. Entre los participantes clave se ubican SENER, CONUEE, Instituciones financieras, CoIDT+i (particularmente el CEMIE-Geo), Industria. Se espera tener resultados en el corto plazo, pero las actividades tienen un carácter permanente.

IMAGEN 13 PREPARACIÓN DEL ALIMENTO A DESHIDRATAR

FUENTE: Grupo iiDEA, UNAM

II.e. Ámbito Ambiental

Para alcanzar el desarrollo sustentable en los proyectos de UDCG es necesario prevenir y minimizar el impacto ambiental de las actividades inherentes a la operación de las instalaciones. Uno de los impactos ambientales más relevantes está relacionado con el uso y calidad del fluido geotérmico (por su composición química). Para atender esta problemática se propone la siguiente acción habilitadora:

- Implementar procedimientos para el control volumétrico del fluido geotérmico en función de su composición química y su disposición en el subsuelo.

A continuación se describe la acción habilitadora y las actividades sugeridas para atenderla.

a) Implementar procedimientos para el control volumétrico del fluido geotérmico en función de su composición química y su disposición en el subsuelo.

Si bien los UDCG ofrecen numerosas ventajas, es necesario prevenir y minimizar su impacto ambiental tanto en las etapas del desarrollo de los proyectos como en la etapa productiva mediante un buen manejo de las instalaciones, como un modo de mantener un equilibrio entre el aprovechamiento del recurso geotérmico y la conservación del medio ambiente.

Los fluidos geotérmicos que se extraen para aprovecharse en UDCG se encuentran generalmente a profundidades someras, típicamente menores a 500 m, y suelen ser parte de acuíferos regionales mayores que no deberían sufrir ningún impacto si se toman las medidas preventivas y correctivas apropiadas, ya que en principio prácticamente todo el fluido extraído se regresará después al subsuelo, con el único cambio de una temperatura menor.

Sin embargo, durante la perforación del o los pozos productores e inyectores deben seguirse todas las medidas preventivas para evitar una posible contaminación al acuífero, de tal manera que la aplicación de UDCG que finalmente se instale no afecte ni la calidad ni la cantidad original del agua subterránea, exceptuando su temperatura.

Por ello es necesario seguir procedimientos sistemáticos para controlar el volumen de fluido que se extrae y el que se inyecta, y monitorear regularmente su composición química para asegurar que no hay cambios negativos.

En la Tabla 24 se proponen una serie de actividades para minimizar el posible impacto ambiental de proyectos de UDCG.

TABLA 24. ACCIONES PRIORITARIAS SUGERIDAS PARA EL CONTROL VOLUMÉTRICO DEL FLUIDO GEOTÉRMICO EN FUNCIÓN DE SU COMPOSICIÓN QUÍMICA Y SU DISPOSICIÓN EN EL SUBSUELO

Fecha de inicio: 2019 Fecha de término: 2021 (permanente)

Acciones prioritarias sugeridas	*Periodo de atención*	*Participantes clave*
Identificar/desarrollar técnicas de caracterización de fluidos geotérmicos	12 meses	SENER, SEMARNAT, CONAGUA, Industria y CoIDT+i, IMTA
Desarrollar procedimientos para el control volumétrico del fluido geotérmico en función de su composición química	12 meses	SENER, SEMARNAT, CONAGUA, Industria y CoIDT+i, IMTA
Implementar los procedimientos en las instalaciones de UDCG	12 meses	SENER, SEMARNAT, CONAGUA, Industria y CoIDT+i, IMTA

Esta acción habilitadora involucra tres actividades.

En primer lugar, se requiere caracterizar químicamente a los fluidos geotérmicos que se extraerán, a fin de identificar la posible problemática asociada, tanto en las instalaciones como en los mantos acuíferos.

Una vez identificadas la problemática, la segunda actividad es desarrollar procedimientos de control del volumen de extracción y reinyección del fluido geotérmico con el fin de mantener el equilibrio en el acuífero.

Esos procedimientos deben especificar la periodicidad y volumen de extracción y reinyección del fluido, lo cual variará dependiendo del tipo de aplicación y de la propia composición química del fluido en cuestión.

Finalmente, se requiere implementar el procedimiento que se haya definido, de acuerdo a las condiciones de las instalaciones. Estas acciones requieren de un plazo de tres años para ser atendidas.

La participación de la CEMIE-Geo se considera relevante para el desarrollo de los procedimientos, apoyado en las capacidades tecnológicas de la CoIDT+i. También se considera como un actor importante a la CONAGUA, desde el punto de vista de la regulación para el manejo del agua.

Otra acción que se recomienda llevar a cabo, es la realización de estudios sobre el "Análisis de Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment)" para las diferentes tecnologías involucradas en los proyectos de UDCG. Estos estudios deberán considerar las mejores prácticas internacionales con el objetivo de evaluar la sustentabilidad ambiental de manera integral e identificar las etapas o procesos que representen un área de oportunidad para mejorar el desempeño ambiental y energético a lo largo de su ciclo de vida (Santoyo-Castelazo *et al;* 2011; Santoyo-Castelazo, *et al;* 2014; Santoyo-Castelazo & Azapagic, 2014).

IMAGEN 14 TRABAJOS DE INSTALACIÓN DE EQUIPO EN EL CAMPO SAN PEDRO LAGUNILLAS, NAYARIT

FUENTE: Grupo iiDEA, UNAM

Diagrama

El Mapa de Ruta es una herramienta gráfica que permite visualizar las acciones a realizar en el corto, mediano y largo plazo para alcanzar las metas y objetivos establecidos.

En particular, el mapa de ruta de UDCG está compuesto por una serie de capas que relacionan la visión, las metas, los impulsores principales, las acciones estratégicas (retos técnicos) y habilitadoras propuestas para mitigar las barreras de tipo regulatorio, económico, social y de recursos humanos, que en conjunto se consideran prioritarias para aprovechar integralmente los recursos geotérmicos en un horizonte de tiempo que abarca de 2018 a 2030.

El esquema inicia con la visión, la cual se ubica en la parte superior. De esta forma, la primera capa muestra la meta que se considera factible alcanzar para el año 2030 en cuanto a la capacidad instalada total de las aplicaciones de UDCG, así como una meta intermedia para el año 2024. Debajo de esta meta general, se presentan las metas específicas para cada una de las aplicaciones de los usos directos y las bombas de calor geotérmico.

La segunda capa muestra los principales impulsores que se identifican actualmente para el desarrollo de los UDCG en México.

La tercera capa contiene las acciones estratégicas asociadas a aspectos de tipo técnico, que fueron identificadas como prioritarias para lograr las metas de las diversas aplicaciones (incluyendo aplicaciones en cascada), presentándose por separado las correspondientes a bombas de calor geotérmico, ya que son específicas de esta aplicación.

En términos generales, las acciones estratégicas reflejan la necesidad de mejorar la rentabilidad de las instalaciones de usos directos a nivel industrial y comercial, garantizar su desempeño y operación, así como generar herramientas que faciliten la ejecución de los proyectos de este tipo.

A continuación, en la cuarta capa, se presentan las acciones habilitadoras de tipo regulatorio, económico, social, ambiental y de recursos humanos. Estas acciones se orientan en general a fomentar el crecimiento del mercado de las aplicaciones de usos directos.

La lectura del diagrama se hace por capas, desde la esquina inferior izquierda a la esquina superior derecha. De esta manera, las acciones que requieren de un menor plazo para atenderse se sitúan en la parte inferior y aquellas que implican un mayor plazo se localizan en la parte superior.

Por último, es importante mencionar que, en algunos casos, el nombre de las acciones tanto estratégicas como habilitadoras, fueron resumidas en el diagrama del mapa de ruta para facilitar su visualización.

Anexo a este reporte se incluye el diagrama correspondiente.

Conclusiones y acciones siguientes

Conclusiones

Los efectos de la emisión de GEI y del cambio climático consecuente han motivado el desarrollo de diferentes políticas para contrarrestarlos. Al respecto, el Gobierno Federal ha establecido compromisos internacionales como los acuerdos firmados en el marco de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático 2015. De esta forma se han establecido metas nacionales para la generación de electricidad mediante diferentes tipos de energía considerados por la ley como energías limpias, incluyendo entre estas a las energías renovables como la geotermia.

Uno de los recursos con gran potencial de aprovechamiento en el país y que puede apoyar para alcanzar las metas nacionales, es justamente la energía geotérmica. Pero la geotermia no sólo puede emplearse para generar energía eléctrica, sino también para obtener directamente el calor del subsuelo y aprovecharlo en diversas aplicaciones como procesos industriales y agrícolas, acondicionamiento y climatización de espacios, concentración de minerales, y balneología, entre otros.

El país dispone de capacidades en investigación, desarrollo tecnológico e ingeniería en el desarrollo de los UDCG, que se han construido desde la década de 1980, cuando la CFE preparó proyectos piloto para aprovechar el fluido residual proveniente de sus plantas geotermoeléctricas. Actualmente, gran parte de estas capacidades se han concentrado en el CEMIE-Geo y se espera que puedan incrementarse para soportar el desarrollo de proyectos comerciales e industriales.

En este mapa de ruta tecnología se plantea una visión al año 2030 que se concreta en una meta de capacidad instalada, expresada en megawatts térmicos (MWt) que se considera factible de alcanzar en ese año y que permitiría aprovechar el calor geotérmico en diferentes aplicaciones de usos directos. Esta meta fue consensuada por expertos en temas de usos geotérmicos directos, provenientes de la CoIDT+i, el gobierno y la industria. Para llegar a ese consenso se analizó la información documental disponible relacionada con el tema, tanto nacional como internacional, así como los puntos de vista de los expertos.

De esta forma, la visión del mapa de ruta es *contar en el año 2030 con un mercado de usos directos del calor geotérmico con una capacidad instalada de 3800 MWt*, de los cuales se espera que 2400 MWt provengan de aplicaciones en cascada, 1000 MWt de otras aplicaciones y finalmente se espera que las bombas de calor geotérmico aporten otros 400 MWt.

Para alzanzar esas metas se han definido acciones estratégicas que están relacionadas con aspectos técnicos y habilitadores de tipo regulatorio, económico, social y ambiental en el corto, mediano y largo plazo que se considera prioritario realizar.

Puesto que la tecnología para el aprovechamiento de los UDCG es madura, probada y se encuentra comercialmente disponible, el mapa de ruta refleja un mayor número de acciones habilitadoras, las cuales buscan resolver las barreras identificadas en los ámbitos regulatorio, económico, social, ambiental y de recursos humanos.

Las acciones estratégicas de tipo técnico se enfocan principalmente en identificar los sitios factibles para desarrollar proyectos de UDCG, incrementar la rentabilidad de las instalaciones, asegurar su desempeño y operación, generar herramientas, y facilitar la ejecución de los proyectos.

Respecto a las bombas de calor, las acciones estratégicas están orientadas en aplicar las capacidades técnicas ya existentes en el país, para implementar proyectos comerciales que permitan mostrar los beneficios de la tecnología y atraer inversión.

En lo que respecta al ámbito regulatorio, las acciones habilitadoras son la necesidad de difundir la normatividad vigente y detallarla con el fin de facilitar la ejecución de los proyectos de UDCG y disponer de mecanismos que sean prácticos y ágiles, coadyuvando con ello a fomentar su crecimiento.

Las acciones habilitadoras del ámbito económico, en general, buscan promover el desarrollo del mercado, aprovechando las capacidades nacionales para desarrollar proyectos demostrativos que capten el interés de los inversionistas.

Desde el punto de vista de los recursos humanos, se requiere incrementar el número de especialistas, así como establecer programas de formación y capacitación a diferentes niveles, desde técnicos hasta posgrados, pasando por certificación de competencias en temas específicos.

Finalmente, en el ámbito social se propone crear estrategias de comunicación enfocada en dos sectores. El primero, la población general, ya que se percibe un desconocimiento de la tecnología y sus beneficios. El segundo es el sector de clientes potenciales, donde es preciso difundir información específica de la tecnología con el objetivo de atraer inversionistas.

En resumen, las acciones estas orientadas a desarrollar el mercado de los UDCG en México, creando proyectos

atractivos para los inversionistas, aprovechando los programas existentes enfocados en apoyar su desarrollo, y continuando con las acciones ya iniciadas en materia regulatoria para dar certidumbre a los proyectos, así como definir los procesos y trámites para la autorización de esos proyectos.

Es importante señalar que para la ejecución exitosa de las acciones descritas en este mapa de ruta es necesaria la participación de diferentes actores, entre ellos la SENER y la CoIDT+i, y en específico el CEMIE-Geo, ya que actualmente este concentra gran parte de las instituciones con experiencia y conocimiento en esta materia en el país. El CEMIE-Geo es un actor indispensable para coordinar la construcción de las capacidades técnicas para el desarrollo del mercado.

Acciones siguientes

Los resultados que se presentan en este mapa ruta tecnológica responden a las condiciones contextuales prevalecientes en el momento en que se desarrollaron los talleres. Por lo anterior, la vigencia y prioridad de algunas acciones podría haberse modificado o bien, pudieran ya estarse atendiendo. A medida que evolucione el aprovechamiento de los recursos geotérmicos a través de la instalación de usos directos en el país, se generará nueva información para actualizar la visión y las premisas que se presentan en este mapa de ruta, por lo que se deberá actualizar periódicamente.

El presente mapa de ruta establece una visión al año 2030, que fue el punto de partida para identificar los principales retos tecnológicos, barreras, y acciones necesarias en el corto, mediano y largo plazo, para desarrollar el mercado de los UDCG en el país. Es recomendable que el mapa se vaya actualizando para adecuarse a los cambios en el contexto tecnológico, regulatorio, económico, social y ambiental, tanto a nivel nacional como internacional.

Se espera que la implementación del mapa de ruta empiece en 2018, lo que requerirá un apoyo sustantivo del gobierno, en particular de la SENER y el CEMIE-Geo, para difundir, impulsar y coordinar las acciones estratégicas definidas en el mismo.

Referencias

Armstead, C. H. (1973). *Geothermal Energy. Review of research and development.* UNESCO.

ASHRAE. (2011). ASHRAE Handbook. HVAC Aplication.

Australian Government - Department of Industry, Tourism and Resources. (2001). *Technology Planning for Business Competitiveness: A Guide to Developing Technology Roadmaps.* Editor Industry, Science an Resources.

Aviña, H. (2018). IIDEA's Installation and Geothermal Food Dehydration Testing System in Geothermal Field at San Pedro Lagunillas (Nayarit Dome). *Presentation from IRENA's GGA Geothermal Direct Utilisation and Food Security workshop*. Reykjavik.

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

BM-SENER. (2017). Proyecto de Eficiencia y Sustentabilidad Energética en Municipios, Escuelas y Hospitales(PRESEMEH), financiamiento Adicional (P165585 & P160778).

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*.

CONOCER. (2010). Guía Técnica para el desarrollo del Estandar de Competencia (EC). *Consejo Nacional de Normalización y Certificación de Competencias Laborales*.

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

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

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

DOF. (2014b, Octubre 31). Reglamento de la Ley de Energía Geotérmica. México.

DOF. (2014c, Enero 12). Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales. Ultima reforma. México.

DOF. (2015, Diciembre 24). Ley de Transición Energética. México.

DOF. (2016, Marzo 24). Ley de Aguas Nacionales. México.

FIDE. (2014). Programa de Ahorro y Eficiencia Energética Empresarial PAEEEM (Eco – Crédito Empresarial) y la NAMA PyME.

FIDE. (2018). *Programa de Financiamiento para Proyectos de Eficiencia Energética y Energías Renovables.* FIDE.

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.

García, A., & Martínez, I. (2012). Estado actual de desarrollo de las Bombas de Calor Geotérmico. *Geotermia*, 58-68.

García, A., & Torres, V. (2016). Estudio de Mercado para la aplicación de Bombas de Calor Geotérmicas en México. *International Technology Collaboration Program of the IEA Central and Sourh Americam Workshop on Geothermal Energy*.

GEF-SENER. (2017). Proyecto de Desarrollo de Tecnologías de Energía Sustentable (PRODETES). *SENER.*

Geothermal Communities Project: European Union. (2017). *Geothermal Communities Project. EU.* Retrieved from http://geothermalcommunities.eu/elearning/chapters

GGA. (2015). *Joint Communiqué on the Global Geothermal Alliance. UN Climate Change Conference Paris 2015.*

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

Hiriart, 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.*

IEA. (2014). *Energy Technology Roadmaps a guide to development and implementation.*

Iglesias, E., & Torres, R. (2003). Low to medium temperature geothermal reserves in Mexico: a first assessment. *Geothermics*, 711-719.

IMP. (2011). *Guía técnica para el desarrollo de mapas de ruta tecnológica (MRT) - Caso PEMEX.* Ciudad de México.

IMP. (2017). *Guía técnica para el desarrollo del mapa de ruta tecnológico de un sector industrial.* Ciudad de México.

IMP-SENER. (2018, Abril 18). Taller para la integración del Mapa de Ruta Tecnológica de Usos Directos del Calor Geotérmico. Ciudad de México.

Jóhannesson, T., & Chatenay, C. (2014a). 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. (2014b). 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. (2014c). 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*.

Kiruja, J. (2011). *Direct Utilization of Geothermal Energy. Presented at Short Course VI on Exploration for Geothermal Resources 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 countries. FAO.* Roma.

Ole Nchoe, J. (2018). Direct Use of Geothermal Energy for Food Security: Towards achieving Kenya's BIG4 Agenda. *Presentation from IRENA's GGA Geothermal Direct Utilisation and Food Security workshop*. Reykjavik.

Phaal, R. (2001). *T-Plan the fast start to technology roadmapping. Planning your route to success.* . Cambridge UK: University of Cambridge, Institute for Manufacturing.

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

RHC. (2013). Implementation Roadmaps: Geothermal Technology. *Renewable Heating and Cooling, European Technology Platform*. Dublin.

RHC. (2014). *Geothermal Technology Roadmap: European Technology Platform on Renewable.*

Rubio-Maya, C., Pastor-Martínez , E., Romero, C., Ambriz-Díaz, V., & Pacheco-Ibarra, J. (2016). Techno-economic assessment for the integration into a multi-product plant based on cascade utilization of geothermal energy. *Applied Thermal Engineering*, 84-92.

Sánchez, R. (2015). *Reporte Técnico RT-RASV-BID-01/15, Aprovechamiento de la Geotermia de Mediana y Baja Temperatura en México con el Marco Legal Existente.* México: BID.

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

Santoyo, E., Guevara, M., & Pérez-Zarate, D. (s.f). *Estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios en el tema de energía geotérmica.* México: Editado por Centro Mario Molina; SENER & CONUEE.

Santoyo-Castelazo, E., & Azapagic, A. (2014). Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*, 119-138.

Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H., & Azapagic, A. (2011). Life Cycle Assessment of Electricity Generation in Mexico. *Energy*, 1488-1499.

Santoyo-Castelazo, E., Stamford, L., & Azapagic, A. (2014). Environmental implications of decarbonising electricity supply in large economies: The case of Mexico. Energy Conversion & Management. 272-291.

SENER. (2014). *Programa Estratégico de Formación de Recursos Humanos en Materia Energética.* Ciudad de México: SENER.

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

SENER. (2016). *www.gob.mx/sener*. Obtenido de https://www.gob.mx/sener/articulos/mexico-es-el-sexto-pais-en-el-mundo-con-mayor-capacidad-instalada-para-la-generacion-de-energia-geotermica?idiom=es

SENER. (2017). *Prospectiva de Energías Renovables 2017-2031.* México: SENER. Recuperado el 04 de 01 de 2017, de http://www.gob.mx: http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44324/Prospectiva_Energ_as_Renovables_2015_-_2029_VF_22.12.15.pdf

SENER. (2017). *Reporte de Avance de Energías Limpias, primer semestre 2017* . México.

SENER-IMP. (2016). *Diagnóstico Tecnológico del CEMIE-Geo.*

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

SENER-IMP. (2018a). *Reporte de Inteligencia Tecnológica en Usos Directos de la Geotermia.* Ciudad de México: IMP.

SENER-IMP. (2018b). *Cartera de Necesidades de Innovación y Desarrollo Tecnológico de usos directos de calor geotérmico.* Ciudad de México.

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.

Torres Luna, V., García Manuel, P., Hernández Ochoa, A., Rivas Cruz, F., González Reyes, I., Martínez Estrella, J., . . . Ling López, J. C. (2016). Proyecto 13 CEMIE-Geo. Bombas de Calor Geotérmico para acondicionamiento de espacios habitacionales y comerciales - Primeros resultados. *XXIII Congreso Anual – Asociación Mexicana de Geotermia.* Morelia, Mich.

Torres, V., Arellano, V., Barragán, R., González, E., Herrera, J., Santoyo, E., & Venegas, S. (1993). Geotermia en México. (UNAM, Ed.) *Programa Universitario de Energía, Coordinación de la Investigación Científica.*, 161.

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

2018

SENER

SECRETARÍA DE ENERGÍA

ESTADOS UNIDOS MEXICANOS