SENER
SECRETARÍA DE ENERGÍA

MAPA DE RUTA TECNOLÓGICA EN GEOTERMIA

2017

SECRETARÍA DE ENERGÍA

Pedro Joaquín Coldwell

Secretario de Energía

Leonardo Beltrán Rodríguez

Subsecretario de Planeación y Transición Energética

Cesar Emilio Hernández Ochoa

Subsecretario de Electricidad

Aldo Flores Quiroga

Subsecretario de Hidrocarburos

Gloria Brasdefer Hernández

Oficial Mayor

Carlos Roberto Ortiz Gomez

Director General de Investigación, Desarrollo Tecnológico y Formación de Recursos Humanos

Edgar Santoyo Castelazo

Director de Innovación Tecnológica

Revisión y Aprobación

Secretaría de Energía

Carlos Roberto Ortiz Gomez

Director General de Investigación, Desarrollo Tecnológico y Formación de Recursos Humanos

Luis Alfonso Muñozcano Álvarez

Director General adjunto de Energías Renovables

Edgar Santoyo Castelazo

Director de Innovación Tecnológica

Michelle Alejandra Ramírez Bueno

Directora de Geotermia

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

José Manuel Romo

Responsable Técnico del CEMIE-Geo

Georgina Izquierdo Montalvo

Instituto de Investigaciones Eléctricas. Gerencia de Geotermia

Comisión Reguladora de Energía

Sergio A. Peraza García

Titular de la Unidad de Sistemas Eléctricos

Elaboración

En colaboración con el Instituto mexicano del petróleo

Rafael Ramos Palmeros

Director de Desarrollo de Talento

Raúl Cruz Marqués

Gerente de Gestión del Conocimiento

María Georgina Ortiz Gallardo

Jefa de Proyecto

Víctor Gerardo Ortiz Gallardo

Líder de la Unidad de Inteligencia Tecnológica Competitiva

César Andrés de la Fuente Melo

Especialista

Carlos Miguel Vega Reyes

Especialista

Agustín González Ortiz

Asesor externo

ÍNDICE

Agradecimientos 11
Introducción 12
Metodología general para la construcción del mapa de ruta 14
Generalidades de la industria de la geotermia en México 17
Desarrollo de la geotermia en México: Generación de electricidad 24
I.- Visión al 2030 24
II.- Implementación de la visión 25
IIa.- Recursos de mediana y alta entalpía 27
IIb.- Recursos de baja entalpía 33
IIc.- Recursos no convencionales: Súper calientes y roca seca caliente 38
Desarrollo de la geotermia en México: Usos directos del calor 45
I. Visión al 2030 45
II. Implementación de la visión 46
Acciones habilitadoras para fortalecer el desarrollo de la geotermia 53
I. Ámbito económico 53
II. Formación de recursos humanos 54
III. Ámbito regulatorio 55
IV. Ámbito social 56
Diagrama 59
Conclusiones y acciones siguientes 61
Referencias bibliográficas 64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas generales para la integración del mapa de ruta tecnológica en geotermia 14
Figura 2. Visión para el desarrollo de la energía geotérmica al 2030 en generación de electricidad 25
Figura 3. Visión para el desarrollo de la energía geotérmica al 2030 en usos directos de calor 45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Campos geotérmicos productivos en México 19
Tabla 2. Retos tecnológicos prioritarios para alcanzar las metas de generación de electricidad al 2030 26
Tabla 3. Principales retos para la generación de electricidad con recursos de mediana y alta entalpía 28
Tabla 4. Principales retos para la generación de electricidad con recursos de baja entalpía 34
Tabla 5. Principales retos para la exploración de recursos no convencionales 39
Tabla 6. Retos tecnológicos prioritarios para lograr el objetivo al 2030 en usos directos del calor 47
Tabla 7. Retos tecnológicos prioritarios para usos directos 47
Tabla 8. Acciones habilitadoras del ámbito económico para fortalecer la industria 54
Tabla 9. Acciones habilitadoras en materia de recursos humanos para fortalecer la industria 55
Tabla 10. Acciones habilitadoras del ámbito regulatorio para fortalecer la industria 56
Tabla 11. Acciones habilitadoras del ámbito social para fortalecer la industria 57

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Recursos geotérmicos continentales....17
Imagen 2. Recursos geotérmicos submarinos....17
Imagen 3. Recursos de roca seca caliente o Sistemas geotérmicos avanzados (EGS, Enhanced Geothermal Systems)....17
Imagen 4. Planta de flash de vapor (condensación)....18
Imagen 5. Planta de ciclo binario....18
Imagen 6. Planta de Energía Geotérmica de Cerro Prieto....18
Imagen 7. Campo geotérmico Los Azufres....20
Imagen 8. Campo geotérmico Los Humeros....20
Imagen 9. Campo geotérmico Tres Vírgenes....20
Imagen 10. Campo geotérmico Domo de San Pedro....21
Imagen 11. Balneología....21
Imagen 12. Bombas de calor....22
Imagen 13. Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE-Geo)....22
Imagen 14. Planta geotérmica Los Azufres III....23
Imagen 15. Los azufres III....28
Imagen 16. Mapeo de recursos geotérmicos....30
Imagen 17. Perforación....31
Imagen 18. Manifestaciones termales superficiales....35
Imagen 19. Intercambiadores de calor de plantas geotérmicas....37
Imagen 20. Sistemas Geotérmicos Súper calientes (SHGS, por sus siglas en inglés, Super-Hot Geothermal Systems)....38
Imagen 21. Calefacción de espacios....46
Imagen 22. Deshidratación de alimentos....46

Abreviaturas y acrónimos

°C	Grados Celsius o centígrados
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CEL	Certificados de Energías Limpias
CEMIE-Geo	Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CICESE	Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CRE	Comisión Reguladora de Energía
EGS	Siglas en inglés de Enhanced Geothermal Systems (Sistemas Geotérmicos Mejorados)
GWh	Gigawatts hora
IDT	Investigación y Desarrollo Tecnológico
IES	Instituciones de Educación Superior
INEEL	Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias
IMP	Instituto Mexicano del Petróleo
kW	Kilowatts
LAN	Ley de Aguas Nacionales
LEG	Ley de Energía Geotérmica
MRT	Mapa de Ruta Tecnológico
MW	Megawatts
MWe	Megawatt eléctrico
MWt	Megawatt térmico
NAFIN	Nacional Financiera
ONG	Organizaciones no gubernamentales
SENER	Secretaría de Energía

SHGS	Siglas en inglés de Super-Hot Geothermal Systems (Sistemas Geotérmicos Súper-calientes)
UMSNH	Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
USD	Dólares estadunidenses

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 CONACYT–Secretaría de Energía-Sustentabilidad Energética (FSE).

Agradecemos al Fondo y a la Secretaría de Energía por su liderazgo, coordinación y por todo el apoyo brindado para la realización de esta iniciativa sin precedente en el país. Asimismo, damos las gracias a los siguientes especialistas que participaron de manera activa y entusiasta durante los talleres y el proceso de retroalimentación de este documento.

Dr. Edgar Santoyo Castelazo	Secretaría de Energía
Lic. Michelle A. Ramírez Bueno	Secretaría de Energía
Ing. David A. Rocha Ruiz	Secretaría de Energía
Lic. Katya Puga Cornejo	Anteriormente adscrita a la Secretaría de Energía
Biol. Tania Rodríguez Salas	CONAGUA
Ing. Ofelia Gabriela Suárez García	CONAGUA
Ing. María de los Ángeles Grimaldo Ortiz	Comisión Reguladora de Energía (CRE)
Dr. José Manuel Romo Jones	CEMIE-Geo - CICESE
Dr. Thomas Gunter Kretzschmar	CEMIE-Geo - CICESE
Ing. Naotoshi Arturo Harada Osawa	CEMIE-Geo - CICESE
Dra. Rosa María Prol Ledesma	CEMIE-Geo - Instituto de Geofísica, UNAM
Dr. Alfonso García Gutiérrez	CEMIE-Geo - Instituto de Ingeniería, UNAM
Lic. Ana Ma. González Sánchez	CEMIE-Geo - Centro de Geociencias, UNAM
Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy	CEMIE-Geo - UMSNH
Dr. Julio Vargas Medina	CEMIE-Geo - UMSNH
Dra. Georgina Izquierdo Montalvo	CEMIE-Geo - INEEL
Dr. José David Nieva Gómez	CEMIE-Geo - INEEL
Dr. Navor Rosas González	CEMIE-Geo -Universidad Politécnica de Baja California
Ing. Luis Carlos Augusto Gutiérrez Negrín	CEMIE-Geo - Geocónsul
M.C. Magaly Flores Armenta	Comisión Federal de Electricidad (CFE)
Ing. Miguel Ramírez Montes	Comisión Federal de Electricidad (CFE)
Ing. Raúl Maya González	Anteriormente adscrito a la CFE
Ing. Juan Luis del Valle Luarca	Grupo Dragón
Dr. Gerardo Hiriart Le Bert	ENAL
Ing. Héctor Gutiérrez Puente	ENAL
Ing. Salvador Espíndola Hernández	ENAL
Ing. Alberto Imberton	ENEL Green Power
Dr. Renato Castro Govea	Instituto Mexicano del Petróleo

Hacemos un reconocimiento a la Agencia Internacional de Energía por su apoyo con la participación de sus expertos que proporcionaron una visión internacional de las acciones que se llevan a cabo para el desarrollo de la industria sustentable de la Geotermia. Un agradecimiento especial para el Dr. Mike Allen y el Dr. Brian Carey.

Introducción

La geotermia es una energía renovable, abundante y cuya explotación presenta menores impactos en el medio ambiente. México cuenta con recursos geotérmicos que pueden ser aprovechados y existe la voluntad de desarrollar de manera sostenible la industria geotérmica.

Actualmente, el aprovechamiento de esta fuente de energía está siendo impulsada por diversos factores, entre los que se encuentran la emisión de un marco regulatorio propio para el aprovechamietno de los recursos geotérmicos, así como los compromisos que México ha establecido a nivel internacional para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

En este contexto, la Ley de Transición Energética establece que para el año 2024 la participación mínima de energías limpias en la generación de electricidad en México deberá ser del 35%, previéndose que este porcentaje sea de un mínimo de 25% en 2018 y de 30% en 2020 (DOF, 2015). Las prospectivas nacionales para el periodo 2015-2029 estiman un incremento en la capacidad de generación de energía eléctrica para alcanzar 13,217 GWh/año a partir de energía geotérmica (SENER, 2015a), contribuyendo a la reducción de gases efecto invernadero, conforme a los compromisos internacionales establecidos en el Acuerdo de París, recientemente aprobado (Naciones Unidas., 2015).

En 2014 se decretó la Ley de Energía Geotérmica (LEG), la cual regula las actividades de exploración y explotación de los recursos geotérmicos del país. La Ley considera el otorgamiento de permisos de exploración en áreas geotérmicas, y en caso de confirmar su viabilidad técnica y económica, así como de cumplir con los requerimientos establecidos, el otorgamiento de concesiones de explotación por 30 años. De esta forma, se busca dar certidumbre jurídica a los proyectos geotérmicos, propiciando mayores inversiones para el crecimiento de la industria. Asimismo, se reliazó una reforma a la Ley de Aguas Nacionales, con el fin de armonizar la regulación de las aguas geotérmicas (DOF, 2016).

Para el Fondo de Sustentabilidad Energética (FSE), el aprovechamiento de las energías renovables es un área de interés nacional, por lo que desde hace varios años lleva a cabo diversas iniciativas encaminadas a fortalecer las capacidades científicas y tecnológicas del país para soportar el desarrollo de la industria. Una de las iniciativas que es considerada estratégica para este propósito, es la creación del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE-Geo), que desde 2014 se encuentra en operación y agrupa instituciones y empresas de todo el país que son referentes en materia de geotermia, se busca que el consorcio genere sinergias en favor del aprovechamiento de la energía geotérmica del país e integre una cartera de proyectos estratégicos cuyos resultados sean de valor para el sector.

Como parte de estas iniciativas, el FSE ha patrocinado la elaboración de los mapas de ruta tecnológica al 2030 para diversos tipos de energía, y entre estos se encuentra el mapa de ruta tecnológica en Geotermia. Con este mapa de ruta, el FSE dispondrá de instrumentos de planeación realizados bajo una metodología homologada que le permitirán direccionar recursos a proyectos de investigación, desarrollo tecnológico e innovación, cuyos resultados tengan impacto en la industria de geotermia en el país.

El mapa de ruta tecnológica que se presenta en este documento considera las dos vertientes de aplicación de la geotermia: generación de energía eléctrica y usos directos del calor, con la salvedad de que éste último se aborda de manera exploratoria. La explotación de recursos geotérmicos a través del uso directo de calor es un campo que deberá estudiarse con mayor profundidad y de manera independiente en futuros ejercicios.

Propósito del mapa de ruta

El propósito de este mapa de ruta tecnológica es *identificar los retos y barreras que enfrenta el país para el aprovechamiento sustentable de la energía geotérmica al 2030*. 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 geotermia 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 incrementar 750 Megawatts de capacidad instalada a la que se tiene actualmente para generar electricidad. Esta visión se estableció a partir de una serie de talleres realizados en junio y julio de 2016 y en los que participaron especialistas en temas de geotermia provenientes de la comunidad de investigación y desarrollo tecnológico, el gobierno y la industria.

Para la orientar la generación de la visión de este mapa de ruta, se consultaron diversos documentos oficiales publicados por la Secretaría de Energía, entre los que se encuentran las Prospectivas de Energías Renovables, Sector Eléctrico, el Inventario Nacional de Energías Renovables y el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional. Adicionalmente, se revisaron documentos de carácter técnico para establecer un panorama general de los avances más recientes en las tecnologías clave para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos.

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; así como 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 recursos geotérmicos de México.

Adicionalmente, es preciso mencionar que los resultados que se presentan 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 siete capítulos. En el primero de ellos se describe la metodología empleada para la generación de este mapa de ruta; posteriormente, se presenta un panorama general de la geotermia en México. En los siguientes tres capítulos se describen los resultados del mapa de ruta, incluyendo la visión al 2030, acciones estratégicas propuestas para implementarla; y las acciones habilitadoras que se consideran prioritarias para fortalecer la industria geotérmica, tanto para generación de electricidad como para usos directos del calor. 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 construcción del mapa de ruta

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 (Australian Government - Department of Industry, Tourism and Resources, 2001):

1. Método basado en la experiencia de expertos.
2. Método de talleres basados en discusiones dirigidas.
3. Método basado en trabajo de escritorio.

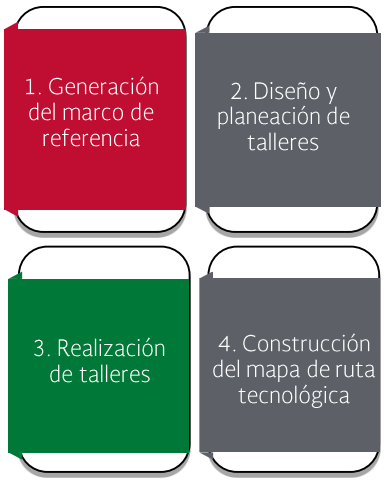
En el caso del mapa de ruta tecnológica de geotermia, su construcción siguió el método de talleres basados en discusiones dirigidas. La realización del mapa bajo este método, implicó toda una serie de actividades que van desde el análisis de la situación actual del aprovechamiento de esta energía en 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 practicas propuestas por la Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency, 2014) y 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 EN GEOTERMIA



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 estructura de la industria, de las

tecnologías clave para el aprovechamiento de la energía geotérmica, y del progreso científico y tecnológico alcanzado en los ámbitos nacional e internacional, en relación a la solución de retos técnicos existentes para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos. Como resultado se generaron dos reportes que fueron insumo fundamental para la definición del enfoque y estructura del mapa de ruta. El primero corresponde al Reporte de Inteligencia Tecnológica en Geotermia (SENER-IMP, 2016a) en el que se documentan los retos técnicos y el estado del arte de las tecnologías clave en el aprovechamiento de este tipo de recursos; el segundo, corresponde al Diagnóstico de la Gestión de la Innovación del CEMIE Geo (SENER-IMP, 2016b), el cual se realizó con el fin de conocer sus líneas de investigación y desarrollo tecnológico, productos y tecnologías por generar, así como las acciones que lleva a cabo para trasferir sus resultados a la industria.

2. Diseño y planeación de talleres

En la segunda etapa, se definió el enfoque particular del mapa de ruta tecnológica, 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.

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 aprovechamiento de los recursos geotérmicos.

3. Realización de talleres.

Los talleres se efectuaron durante los meses de junio y julio de 2016 en las instalaciones del Instituto Mexicano del Petróleo en la Ciudad de México. En los talleres se contó con la participación de alrededor de treinta especialistas representantes de la comunidad de investigación, desarrollo tecnológico e innovación[1], industria y órganos reguladores. Las instituciones representadas en los talleres se indican a continuación:

- Secretaría de Energía
- Comisión Reguladora de Energía
- Comisión Nacional del Agua
- Comisión Federal de Electricidad
- CEMIE-Geo
  - CICESE
  - UNAM
  - UMSNH
  - INEEL
  - Universidad Politécnica de Baja California
  - Geocónsul
- Grupo Dragón
- ENAL
- ENEL Green Power
- Instituto Mexicano del Petróleo
- Agencia Internacional de Energía

Durante los talleres, los participantes compartieron sus perspectivas actuales y futuras del desarrollo del sector; opiniones en relación a la capacidad instalada, los principales retos y barreras que limitan el crecimiento del sector y la adopción de nuevas tecnologías; 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 documenta 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, principales retos y barreras identificadas, acciones prioritarias sugeridas, plazos de atención y diagrama preliminar del mapa de ruta, lo anterior, para su revisión y retroalimentación. Los comentarios recibidos se integraron en el documento final del mapa de ruta tecnológica, que fue presentado al Grupo Consultivo para su aprobación.

[1] 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. (CoIDT+i).

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. El objetivo de este documento es ofrecer información que sirva como base para generar iniciativas de proyectos específicos (SENER-IMP, 2017).

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 consultados se encuentran: la Prospectiva de Energías Renovables 2015-2029, Prospectiva del Sector Eléctrico 2015-2029, Inventario Nacional de Energías Renovables (2016), Reporte de Avance de Energías Limpias al Primer Semestre de 2016 y el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (2016 – 2030).

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, Comisión Reguladora de Energía, Comisión Federal de Electricidad, y CEMIE Geo. 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.

Alcances y limitaciones

El mapa de ruta tecnológica presenta una serie de acciones estratégicas y habilitadoras que se consideran prioritarias para fortalecer el desarrollo de las capacidades tecnológicas necesarias para alcanzar la visión al 2030 hacia el aprovechamiento de los recursos geotérmicos; asimismo, se establecen un conjunto de actividades específicas propuestas, actores y plazos estimados para su realización. Es importante mencionar que estas acciones, actividades, actores y plazos, son una propuesta y no representan un programa de trabajo, sino una perspectiva global de las implicaciones y requerimientos para impulsar el aprovechamiento de los recursos geotérmicos con los que cuenta nuestro país. En los talleres se indicaron un amplio número de retos tecnológicos y barreras, sin embargo, sólo se analizaron con detalle aquellos que los participantes consideraron de mayor relevancia con el objetivo de alcanzar la visión generada al 2030 y son los que se discuten en este reporte.

El mapa de ruta resultante es además influenciado por las condiciones técnicas, políticas, económicas, legales y sociales prevalecientes en el contexto nacional al momento en que se desarrollaron los talleres. Sin embargo, debido al dinamismo de cada industria, algunos aspectos contextuales podrían cambiar y modificar la velocidad de crecimiento del sector y/o asimilación de nuevas tecnologías, y en consecuencia, alterar la prioridad de las acciones sugeridas, o bien, indicar la necesidad de considerar nuevas líneas de acción. Por lo anterior, la vigencia, prioridad, actores y/o plazos indicados podrían modificarse en la medida en la que existan cambios en el entorno en alguno de los ámbitos señalados.

Finalmente, la participación de los distintos actores que se establecen en las acciones sugeridas que se presentan en este mapa, es de carácter indicativo, su finalidad es orientar la definición de políticas públicas, programas e iniciativas, enfocadas en fortalecer, incrementar y/o generar las capacidades tecnológicas necesarias para dar soporte al desarrollo sustentable de la industria en el mediano y largo plazo, incluyendo infraestructura, recursos humanos especializados, y servicios tecnológicos, entre otros.

Generalidades de la industria de la geotermia en México

El objetivo principal de la geotermia es el aprovechamiento del calor natural existente en el interior de la tierra. Esta energía proviene del calor remanente desde la formación del planeta y de la desintegración de minerales radiactivos de la litósfera, y es transportada a través de las rocas por conducción y/o convección mediante fluidos hacia la superficie terrestre (ESMAP, 2012).

La geotermia tiene un potencial muy alto de aprovechamiento, ya que por ser una fuente de energía limpia, flexible, confiable y abundante ofrece ventajas económicas y ambientales sobre la proveniente de combustibles fósiles. Los recursos pueden aplicarse en la generación de electricidad y en los llamados usos directos que incluyen el calentamiento/enfriamiento de espacios y viviendas, la balneología, la deshidratación de alimentos, entre otros.

Los recursos geotérmicos pueden clasificarse desde diferentes puntos de vista. Por su temperatura se clasifican en recursos de alta, mediana y baja entalpía. Por su ubicación pueden ser continentales o submarinos (Ver imagenes 1 y 2). Por la existencia de fluidos geotérmicos pueden ser hidrotermales o de roca seca caliente (Santoyo, Guevara, & Pérez-Zarate, 2015). Pero, casi todos los recursos geotérmicos que se utilizan en el mundo son recursos de tipo hidrotermal, por lo que se les denomina recursos geotérmicos convencionales.

IMAGEN 1. RECURSOS GEOTÉRMICOS CONTINENTALES

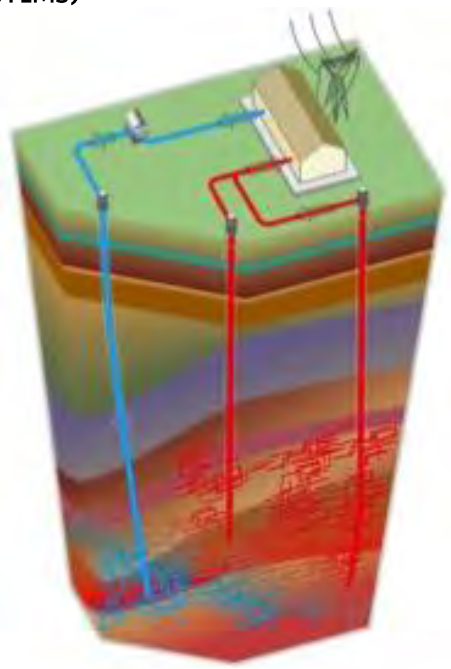
FUENTE: ESMAP, Manual de geotermia: cómo planificar y financiar la generación de electricidad, 2012.

IMAGEN 2. RECURSOS GEOTÉRMICOS SUBMARINOS

FUENTE: Página WEB http://www.piensageotermia.com/ventilas-oceanicas-la-geotermia-desconocida/

Los recursos de roca seca caliente se consideran no convencionales, junto con otros como los sistemas geotérmicos súper-calientes (Ver imagen 3).

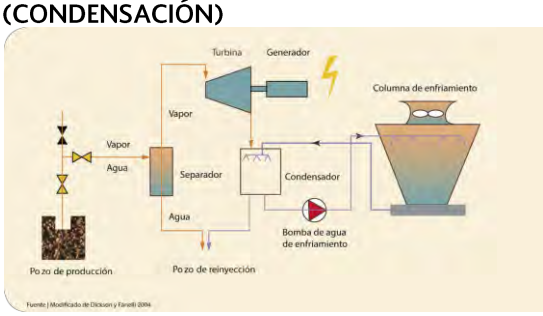
IMAGEN 3. RECURSOS DE ROCA SECA CALIENTE O SISTEMAS GEOTÉRMICOS AVANZADOS (EGS, ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEMS)



FUENTE: Página WEB http://cemiegeo.org/index.php/proyectos/usos-directos-del-calor-geotermico/p22/9-linea-de-investigacion/proyecto

Tanto en México como en el resto del mundo, para generar energía eléctrica se aprovechan principalmente recursos hidrotermales de alta temperatura (más de 200°C), cuya tecnología de explotación es bien conocida y madura y consiste en el empleo de plantas de *flash de* vapor que pueden ser a condensación, a contrapresión o de vapor seco, a continuación se muestra una imagen que ilustra este tipo de plantas.

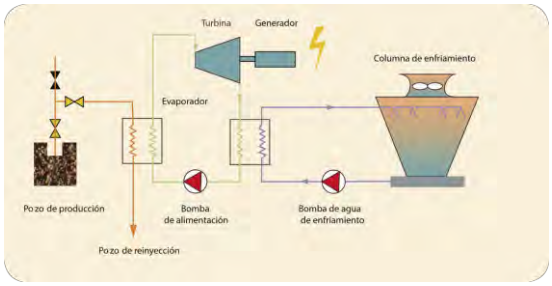
IMAGEN 4. PLANTA DE FLASH DE VAPOR (CONDENSACIÓN)



FUENTE: ESMAP, Manual de geotermia: cómo planificar y financiar la generación de electricidad, 2012.

En el mundo también se utilizan recursos hidrotermales de temperatura media a baja para generación de electricidad en plantas de ciclo binario, cuya tecnología es ampliamente difundida (Ver imagen 5).

IMAGEN 5. PLANTA DE CICLO BINARIO



FUENTE: ESMAP, Manual de geotermia: cómo planificar y financiar la generación de electricidad, 2012.

Por su capacidad geotermoeléctrica instalada, México ocupó en 2015, el cuarto lugar a nivel mundial con 1017 Megawatts, después Estados Unidos, Filipinas e Indonesia (Bertani, 2015). Asimismo, posee uno de los campos geotérmicos más grandes del mundo que es el de Cerro Prieto, ubicado al sur de Mexicali, Baja California, con una capacidad instalada en operación de 570 Megawatts (Ver imagen 6). Durante 2015, los cinco campos geotérmicos en operación en el país generaron 6,331 Gigawatts-hora (GWh).

IMAGEN 6. PLANTA DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE CERRO PRIETO

FUENTE: SENER

Con la reforma energética promovida por el gobierno federal en el 2013, se regula la inversión en la industria geotérmica nacional, con el fin de dar seguridad jurídica a los inversionistas, incentivando a nuevos proyectos que buscan revertir la desaceleración que entre 1988 y 2010 sufrió la geotermia en México, producto de barreras regulatorias y financieras, entre otros aspectos. Como parte de esta reforma, se aprobaron, en agosto del 2014, dos nuevas leyes,

la Ley de la Industria Eléctrica (DOF, 2014a) y la Ley de Energía Geotérmica (DOF, 2014b).

La primera implica la creación de un mercado mayorista de energía eléctrica abierto a la inversión privada, el cual es controlado por el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), en acuerdo con las políticas que dicta la CRE y la SENER. La segunda ley, tiene por objetivo regular las actividades de reconocimiento, exploración y explotación de recursos geotérmicos.

Adicionalmente, se realizó una reforma a la Ley de Aguas Nacionales (DOF, 2016) sobre la disponibilidad del recurso, la inclusión del término agua geotérmica, entre otros temas. Previamente a la entrada en vigor de estas leyes, la CFE era el único organismo generando energía eléctrica mediante el aprovechamiento de recursos geotérmicos (Gutiérrez Negrín, 2014).

Considerando este marco de referencia, se espera que al 2029 la energía geotérmica tenga un crecimiento de 121%, alcanzando 1,934 MW de capacidad efectiva instalada (SENER, 2015a) e incrementando su participación en la generación de electricidad (SENER, 2015b) del 1.9% registrado en 2014 al 4% en 2029.

Capacidades actuales para la explotación de la energía geotérmica

En marzo del año 2015, por primera vez en México un campo geotérmico privado empezó a generar y a comercializar electricidad (El Economista, 2015). Se trata del campo geotérmico Domo de San Pedro (Nayarit), donde Grupo Dragón puso en operación dos unidades a contrapresión de 5 MW de capacidad cada una (Grupo Dragón, 2016). En febrero de ese mismo año, la CFE puso en operación una nueva unidad de 53 MW en el campo geotérmico de Los Azufres (Michoacán), denominada Los Azufres III, Fase 1 (Comisión Federal de Electricidad, 2015a), retirando al mismo tiempo cuatro unidades a contrapresión de 5 MW cada una. A principios de 2016 Grupo Dragón instaló una nueva unidad de condensación de 25.5 MW en el Domo San Pedro.

La capacidad geotermoeléctrica actual de México es de 920.4 MW, tal como se desglosa en la tabla 1 que muestra un resumen de los campos geotérmicos en producción.

TABLA 1. CAMPOS GEOTÉRMICOS PRODUCTIVOS EN MÉXICO

Campo	Inicio de operación	Capacidad instalada en MW	Productor
Cerro Prieto	1973	570	CFE
Los Azufres	1982	225	CFE
Los Humeros	1990	80.4	CFE
Las Tres Vírgenes	2002	10	CFE
Domo de San Pedro	2015	35	Grupo Dragón
	Total	**920.4**	

FUENTE: Dirección de Geotermia, SENER, 2017.

El campo geotérmico de Cerro Prieto (Baja California), es el campo productivo más grande y con más años de funcionamiento en México. Entró en operación en 1973 y tiene un total de 9 unidades con capacidades que varían entre 25 y 111 MW. Las cuatro unidades más antiguas, instaladas en 1973 y 1979, ya no operan desde 2011-2012 y fueron desmanteladas recientemente, por lo que la capacidad instalada total del campo es de 570 MW.

La producción de electricidad de Cerro Prieto alcanzó 4,028 GWh en 2015.

En 1982, inició la generación eléctrica en el campo geotérmico de Los Azufres (Michoacán), el cual es actualmente el segundo más productivo de México con una capacidad total instalada de 225 MW (ver tabla 1). En 2015 el campo produjo 1,700 GWh de energía electrica.

IMAGEN 7. CAMPO GEOTÉRMICO LOS AZUFRES

FUENTE: Página WEB http://proyectofse.mx/2016/01/11/la-geotermia-mexico-7-datos-recordar/

El campo Los Humeros (Puebla), inició sus actividades de producción en 1990 y alcanza actualmente una capacidad instalada de 80.4 MW. La producción de energía eléctrica en Los Humeros fue de 408.2 GWh en 2015.

IMAGEN 8. CAMPO GEOTÉRMICO LOS HUMEROS

FUENTE: Página WEB http://saberesyciencias.com.mx/2012/11/04/la-geotermia-en-mexico-central-de-los-humeros-puebla/

El cuarto campo geotérmico operado por CFE es Las Tres Vírgenes (Baja California). Es el más pequeño y empezó a producir en el año 2002, cuando se instalaron dos unidades a condensación de 5 MW, las cuales siguen operando hasta la fecha. Con esos 10 MW de capacidad instalada, en 2015 el campo generó 48 GWh.

IMAGEN 9. CAMPO GEOTÉRMICO TRES VÍRGENES

FUENTE: SENER

Finalmente, el campo geotérmico del Domo San Pedro, operado por Grupo Dragón inició operaciones en el año 2015 con la instalación y montaje de dos unidades a contrapresión de 5 MW cada una. En marzo de 2016 concluyó la instalación de una unidad a condensación de 25.5 MW, actualmente su capacidad instalada es de 35 MW.

IMAGEN 10. CAMPO GEOTÉRMICO DOMO DE SAN PEDRO

FUENTE: Página WEB http://www.piensageotermia.com/grupo-dragon-ponto-pondra-en-marcha-la-unidad-3-de-255-mw-en-domo-de-san-pedro-mexico/

Usos directos del calor

En cuanto a los usos directos de la geotermia, el aprovechamiento en México se limita principalmente al uso de agua caliente en balnearios y albercas para fines recreativos o terapéuticos. La capacidad instalada para tal uso se estima en 155.34 MWt, de un total de 155.8 MWt que posee el país (Lund & Boyd, 2015).

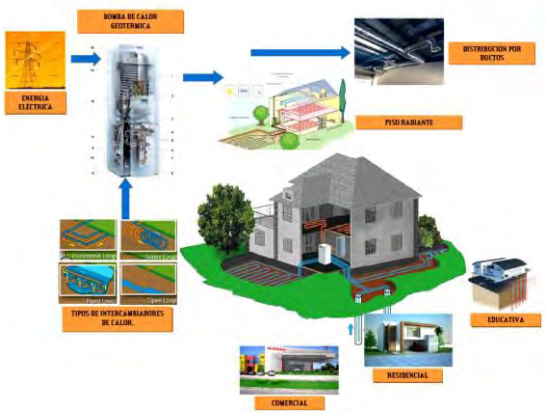
Una de las aplicaciones diferentes a lo que es la balneología, fue desarrollada por CFE en el campo geotérmico de los Azufres, en donde desarrolló un proyecto para calentamiento de espacios, con una capacidad instalada de 0.47 MWt (Gutiérrez-Negrín, Maya-González, & Quijano-León, 2015).

IMAGEN 11. BALNEOLOGÍA

FUENTE: Blue Lagoon, Iceland http://www.bluelagoon.com/

Con respecto a las bombas de calor geotérmico, en México solo se conocen un par de proyectos demostrativos que lleva a cabo el CEMIE-Geo.

IMAGEN 12. BOMBAS DE CALOR



FUENTE: Diagrama conceptual de una bomba de calor geotérmica, Alfonso García-Gutiérrez, Memorias del XXII Congreso Anual, AGM, 2015

Capacidades de soporte para la realización de investigación y desarrollo tecnológico

Con relación a las capacidades tecnológicas de soporte existentes en el país, el gobierno federal, creó en febrero del 2014, el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE-Geo), que es un consorcio integrado por 22 instituciones académicas y empresas privadas (Ver imagen 13).

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, mediana y baja entalpía para generación de electricidad y usos directos. El CEMIE-Geo incorpora a prácticamente todas las instituciones de educación superior y centros de investigación relacionados con la geotermia en México.

IMAGEN 13. CENTRO MEXICANO DE INNOVACIÓN EN ENERGÍA GEOTÉRMICA (CEMIE-GEO)

FUENTE: Página WEB http://cemiegeo.org/

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.

El número de especialistas involucrados en la realización de proyectos geotérmicos en el país es reducido, y si bien se trata de profesionales con amplia experiencia, resulta igualmente importante fortalecer el desarrollo de especialistas en geotermia en las nuevas generaciones, cuyo crecimiento crezca a la par del de la industria. Al respecto, el CEMIE-Geo coordina un programa de formación de recursos humanos de alto nivel especializados en Geotermia en tres niveles: diplomados, maestría y doctorado.

Futuros proyectos

Está a punto de concluir la instalación y montaje de una planta a condensación de 26.8 MW en el campo de Los Humeros, y, en cuanto lo haga, dejará de operar las últimas tres plantas a contrapresión de 5 MW que aún operan en ese campo.

Además, se prevé la puesta en operación de una unidad adicional de 25 MW en el campo de Los Azufres para principios de 2018, que se denomina Los Azufres III Fase 2 (Comisión Federal de Electricidad, 2015b). Adicionalmente, se tienen planeados para el año 2020, otros proyectos de expansión de campos existentes como en Los Humeros, con la instalación de dos unidades de 27 MW; se planea la construcción de Cerro Prieto V de 100 MWe y un proyecto de tipo ciclo binario de

45MW, así como la instalación de una planta de ciclo binario de 2 MW en Las Tres Vírgenes y un crecimiento de hasta 50 MW en el Domo San Pedro.

Se planea también el desarrollo y crecimiento de nuevos campos geotérmicos: 100 MW en el Volcán Ceboruco (Nayarit), 75 MW en Cerritos Colorados (Jalisco) y 30 MW en otras zonas promisorias del país. Con estos proyectos se espera elevar la capacidad geotermoeléctrica instalada neta (descontando retiros) en más de 400 MW (Gutiérrez-Negrín, Maya-González, & Quijano-León, 2015).

Además de los recursos geotérmicos de tipo hidrotermal o también llamados convencionales, que son los que actualmente se emplean para generar la mayoría de la energía eléctrica en el mundo, existen otros tipos de recursos no convencionales, entre los que se encuentran los súper calientes, los hidrotermales submarinos, geopresurizados y los de roca seca caliente.

IMAGEN 14. PLANTA GEOTÉRMICA LOS AZUFRES III

FUENTE: SENER.

Desarrollo de la geotermia en México: Generación de electricidad

I.- Visión al 2030

Actualmente, el desarrollo de la energía geotérmica en el país está siendo impulsado por diversos factores, entre los que se encuentran las reformas al marco regulatorio, la implementación de un mecanismo de mitigación de riesgos en la exploración geotermia, susceptible de extensión en las siguientes fases del proyecto, así como los compromisos que México ha establecido a nivel internacional para la reducción de emisiones de dióxido de carbono. México cuenta con recursos geotérmicos importantes que pueden ser aprovechados, tanto para la generación de energía eléctrica, como para otros usos. La energía proveniente de estos recursos puede aumentar su participación en la matriz energética de México hacia el 2030, y tiene la ventaja de ser considerada una de las energías que presentan menores impactos en el medio ambiente.

La visión que se establece en este mapa de ruta para generación de electricidad a partir de la geotermia, deriva del análisis de una serie de elementos entre los que se encuentran la regulación vigente, la capacidad instalada actual y la que se espera tener en el 2029 [2], la competitividad de la energía geotérmica, con otras energías como son la solar y eólica, así como proyectos en desarrollo y nuevos proyectos que se podrían generar a partir de los permisos de exploración vigentes y que se concederán en los próximos años. Con base en los elementos de análisis mencionados se visualiza que es factible ***adicionar 750 megawatts de capacidad instalada a la existente para generar electricidad a partir de energía geotérmica en el 2030.***

Con este incremento, el país contará con una capacidad instalada total de 1670.4 MW en el año 2030, de los cuales, 105 MW estarán disponibles entre el 2020 y el 2024, ya que se espera que durante este periodo, se concluyan cuatro proyectos que actualmente están en ejecución en los estados de Nayarit y Jalisco (SENER, 2016a). Ver figura 2.

Enfoque

De los distintos recursos geotérmicos que existen en el país y que pueden ser aprovechados para la generación de electricidad, se abordan en este mapa de ruta aquellos que cuentan con mayor potencial de contribución en la generación de electricidad en México. Los tipos de recursos con mayor potencial se pueden clasificar en tres categorías:

- Mediana y alta entalpía.
- Baja entalpía.
- No convencionales: súper calientes y roca seca caliente.

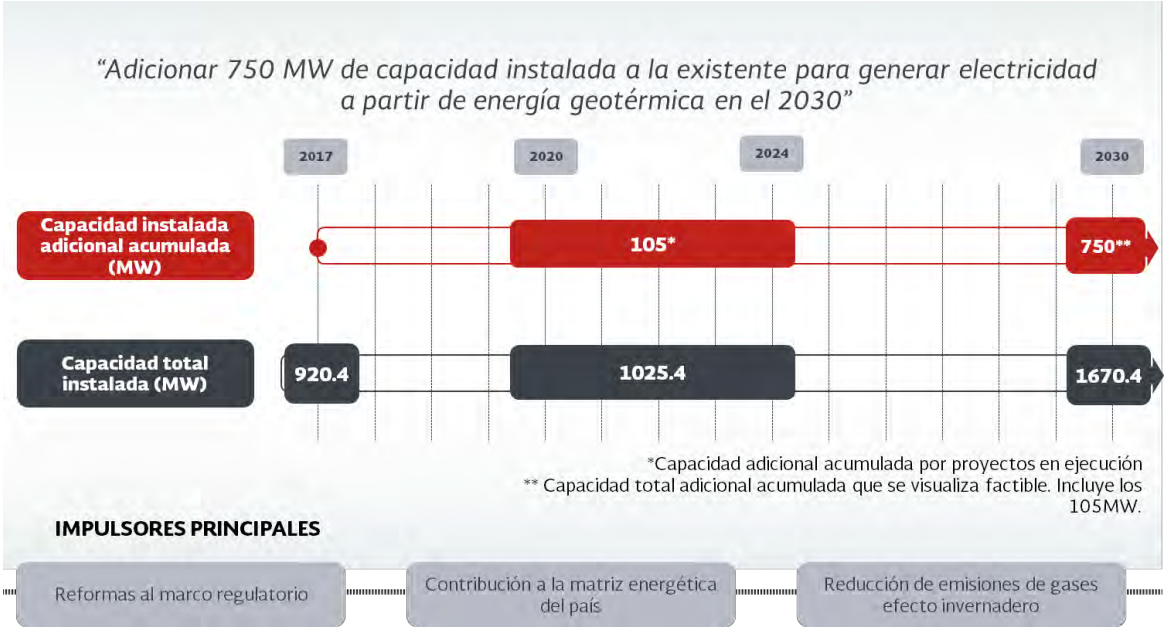
Actualmente en México, se emplean para producir electricidad únicamente recursos de alta entalpía.

No obstante, los recursos no convencionales, como roca seca caliente, podrían ser una fuente de energía en el futuro. Las tecnologías requeridas para explotar este tipo de recursos se encuentran aún en sus fases iniciales de desarrollo en el ámbito internacional y se considera que podrían estar disponibles en un futuro (Stephens & Jiusto, 2010).

Derivado de que no existe un consenso internacional en relación a las fronteras de temperatura entre los recursos geotérmicos, para fines de este mapa de ruta se consideran los siguientes rangos: a) Baja entalpía: Menor o igual a 90°C; b) Mediana entalpía, mayores a 90°C y menores o iguales a 150°C; c) Alta entalpía: mayores de 150°C o iguales a 320°C y d) Sistemas súper calientes superiores a los 320°C.

[2] Con base en la Prospectiva de energías renovables 2015-2029 de la Secretaría de Energía, se espera que al 2029 se tengan 1934 MW de capacidad instalada.

FIGURA 2. VISIÓN PARA EL DESARROLLO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA AL 2030 EN GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD



Estrategia

La incorporación de 750 MW adicionales de capacidad instalada al 2030 es factible. Su realización implica la combinación de una estrategia de desarrollo acorde al estado actual de la tecnología, al costo de acceso a la misma, y la superación de la brecha de capacidades tecnológicas existentes en el país para desarrollar e implementar tecnologías de nueva generación.

Para el caso del aprovechamiento de recursos geotérmicos convencionales (recursos hidrotermales de alta, mediana y baja entalpía), es posible seguir una estrategia de desarrollo tecnológico basada en las capacidades existentes a nivel nacional. Para este tipo de recursos la tecnología es madura y está disponible, además de que la brecha de capacidades tecnológicas a nivel nacional, es relativamente menor.

En el ámbito nacional, existe la infraestructura relevante, herramientas y especialistas necesarios para optimizar las tecnologías y explotar este tipo de recursos para la generación de electricidad.

En lo que respecta a los recursos no convencionales, la estrategia tecnológica a seguir es la colaboración con entidades extranjeras. Para estos recursos, la tecnología necesaria para su aprovechamiento está aún en fases incipientes de desarrollo en el ámbito internacional.

Dado que existen grupos de investigación dedicados en caracterizar los fenómenos relevantes y alternativas conceptuales para aprovechar este tipo de recursos en diferentes partes del mundo, el establecimiento de colaboraciones con entidades internacionales que ya han avanzado en temas relevantes para México, podría permitir la asimilación del conocimiento necesario para implementar las tecnologías que se desarrollen para aprovechar este tipo de recursos en el territorio nacional.

II.- Implementación de la visión

Con el propósito de alcanzar los objetivos y metas establecidos en el mapa de ruta, se plantean una serie de acciones consideradas estratégicas, que tienen correspondencia con los principales retos que se enfrentan para el desarrollo sostenible de la generación de electricidad a partir de geotermia.

Los retos se encuentran en las etapas de exploración y perforación, así como en la construcción y operación de las plantas geo-termoeléctricas. Los retos identificados en su mayoría reflejan, por una parte, la necesidad de reducir los costos de operación de las plantas existentes, y para el caso de nuevas instalaciones, la disminución de los costos de inversión a través de la reducción del riesgo exploratorio y los costos de perforación.

Los retos correspondientes a los recursos no convencionales, en general, se refieren a la identificación de prospectos y localización de fuentes de calor, desarrollo de tecnologías de perforación y construcción de pozos, que consideren las altas temperaturas y los fluidos corrosivos presentes en sistemas súper calientes, así como el desarrollo de metodologías adecuadas y ambientalmente aceptables para generar permeabilidad secundaria en los sistemas de roca seca caliente, aspectos congruentes con lo que se hace a nivel internacional, ya que estos recursos aún se encuentran en investigación.

Uno de los temas relevantes para el logro de los objetivos establecidos al 2030, tiene que ver con el fortalecimiento de la vinculación entre la industria y la academia para direccionar de manera efectiva sus necesidades; de tal forma que los resultados de los proyectos de investigación y desarrollo tecnológico sean aplicables a la industria e incrementen su competitividad.

En la tabla 2 se presentan los retos tecnológicos que se considera tienen mayor impacto en el logro de los objetivos y metas que se han establecido al 2030.

TABLA 2. RETOS TECNOLÓGICOS PRIORITARIOS PARA ALCANZAR LAS METAS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD AL 2030

Generación de electricidad
Recursos de mediana y alta entalpía
• Reducir la incertidumbre en la exploración. • Disponer de metodologías integrales e innovadoras de exploración para el mapeo de recursos geotérmicos potenciales. • Reducir costos, riesgos e incertidumbre en la perforación. • Optimizar el aprovechamiento energético a nivel de planta. • Mejorar el desarrollo de proyectos de colaboración industria y academia.
Recursos baja entalpía
• Identificar el potencial de generación de energía eléctrica a partir de sitios de calor de baja entalpía que aún no están siendo aprovechados. • Optimizar costo-beneficio de sistemas de generación binarios. • Resolver problemas de incrustaciones en sistemas de generación binarios.
Recursos no convencionales: Súper calientes y roca seca caliente
• Mejorar los modelos termodinámicos, fisicoquímicos y de simulación mediante la incorporación de estudios termodinámicos de procesos de interacción agua-roca. • Disponer de técnicas y materiales que permitan el aprovechamiento de los sistemas súper calientes y resolver los problemas de corrosión y erosión. • Desarrollar modelos termodinámicos para el aprovechamiento de sistemas súper calientes. • Desarrollar y mejorar técnicas de exploración de sistemas con baja permeabilidad y sin manifestaciones hidrotermales en superficie. • Desarrollar metodologías ambientalmente aceptables para generar permeabilidad secundaria en los sistemas de roca seca caliente.

En las siguientes secciones se abordan con mayor detalle cada uno de los retos tecnológicos y acciones estratégicas consideradas como prioritarias para alcanzarlos. Se presentan los resultados esperados de la solución de los retos, la estrategia a seguir, el plazo para su atención y los actores involucrados. Al respecto es importante mencionar que se identifican tres grupos de actores. El primero está integrado por los órganos reguladores del sector, siendo la SENER, la CRE y la CONAGUA los actores clave. Entre sus principales roles se encuentran el establecimiento de políticas para el desarrollo de la industria y mejorar su regulación, dar soporte a la investigación y el desarrollo tecnológico, así como propiciar el financiamiento en las etapas de mayor riesgo para la industria.

En el siguiente grupo, que se integra por la Comunidad de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación[3], se encuentra el CEMIE-Geo, que podría encabezar la coordinación de la ejecución de proyectos de investigación, desarrollo tecnológico e innovación enfocados en resolver problemas de la industria y en desarrollar capacidades tecnológicas para incrementar el aprovechamiento de los recursos geotérmicos.

Finalmente, el grupo de la Industria está integrado por los desarrolladores de proyectos y compañías de apoyo, cuya participación es relevante para colaborar en la identificación, desarrollo e implementación de los resultados de los proyectos de investigación y desarrollo tecnológico que permitan incrementar el desempeño de sus operaciones. Actualmente, la Comisión Federal de Electricidad y Grupo Dragón son las únicas empresas que generan y comercializan electricidad en el país mediante el aprovechamiento de energía geotermica.

IIa.- Recursos de mediana y alta entalpía

El empleo de los recursos de mediana y alta entalpía (arriba de 90°C y hasta 320°C) para generación de electricidad, involucra la solución de cinco retos establecidos como prioritarios. En general, los retos reflejan problemáticas asociadas por una parte a la reducción de costos y riesgos en dos etapas importantes de la cadena de valor como son la exploración y la perforación; y por otra, en la optimización del aprovechamiento energético en las plantas.

Para hacer frente a los retos identificados en este tipo de recursos geotérmicos, se plantean estrategias que implican la realización de proyectos conjuntos academia-industria del tipo investigación aplicada, desarrollo tecnológico y asimilación de tecnología, cuyos resultados tomen en cuenta las mejores prácticas internacionales y sean probados en campo al momento de ejecución de un proyecto. La tabla 3 presenta los retos, los resultados esperados de su solución y las estrategias preferentes para abordarlos.

[3] 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 al CEMIEs- GEO. (ColDT+i).

IMAGEN 15. LOS AZUFRES III

Fuente: SENER

TABLA 3. PRINCIPALES RETOS PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD CON RECURSOS DE MEDIANA Y ALTA ENTALPÍA

Reto	Resultado esperado	Estrategia
Reducir la incertidumbre en la exploración.	Metodologías y técnicas probadas que reduzcan el nivel de incertidumbre en la exploración de recursos.	Asimilación de tecnología y desarrollo tecnológico con capacidades nacionales, en colaboración industria-academia.
Disponer de metodologías integrales e innovadoras de exploración para el mapeo de recursos geotérmicos potenciales.	Metodologías integrales probadas en campo que permitan reducir la incertidumbre en la identificación de recursos.	Asimilación de tecnología y desarrollo tecnológico con capacidades nacionales.
Reducir costos, riesgos e incertidumbre en la perforación.	Métodos y técnicas novedosas que reduzcan los costos, el riesgo y la incertidumbre en la perforación. Estándares nacionales para perforación geotérmica basados en las mejores prácticas.	Asimilación y adaptación de tecnología y mejores prácticas.

Reto	Resultado esperado	Estrategia
Optimizar el aprovechamiento energético a nivel de la planta.	Modelo para optimizar el aprovechamiento energético de las plantas geotérmicas. Metodologías para la recolección de datos de plantas, caracterizar los fluidos y equipos de proceso clave requeridos para simular y optimizar el aprovechamiento energético de las plantas. Metodologías y herramientas de simulación y optimización para el aprovechamiento energético integral de las plantas geotérmicas (modificación de condiciones de operación, cambio de equipos de procesos clave intercambiadores de calor, separadores), cambio de fluidos térmicos, incorporación de instalaciones para el aprovechamiento en cascada del recurso.	Realizar investigación aplicada y desarrollo tecnológico orientado a mejorar la eficiencia energética de las instalaciones geotérmicas.
Mejorar el desarrollo de proyectos de colaboración industria y academia.	Mecanismos de comunicación y vinculación entre la academia y la industria para proponer soluciones conjuntas. Proyectos de investigación y desarrollo tecnológico con resultados probados en campo. Procedimientos, herramientas, modelos, metodologías, etc., que atiendan los requerimientos de la industria.	Realizar investigación aplicada y desarrollo tecnológico en colaboración entre la industria y la academia.

A continuación, se presentan las acciones, tiempo estimado para su realización y los participantes clave para cada uno de los retos tecnológicos considerados.

a) *Reducir la incertidumbre en la exploración*

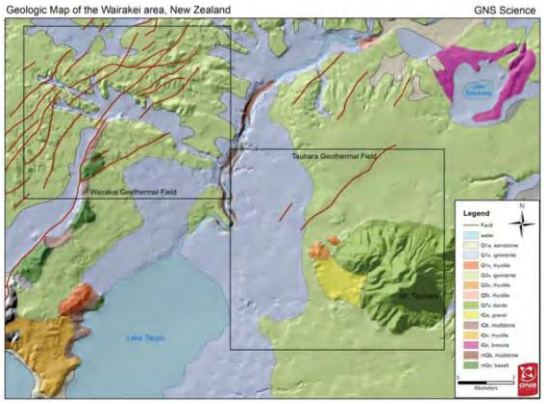
Fecha de inicio: 2017. Fecha de terminación: 2020.

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Mejorar los métodos de prospección geofísica y la sensibilidad de detección de señales.	48 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria).
Mejorar las técnicas geoquímicas de exploración.	36 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria).

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Desarrollar métodos para el procesamiento robusto de datos geofísicos.	48 meses	CEMIE-Geo, ColDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria).
Mejorar los métodos geológicos de exploración (metodologías avanzadas de análisis petrológico, fechamiento de rocas, etc.).	48 meses	CEMIE-Geo, ColDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria).

La incertidumbre en la exploración está asociada, en gran medida, a los métodos indirectos (geofísica) del estudio del subsuelo. Previamente a la perforación se desconocen datos directos de las rocas y fluidos de un posible yacimiento, aunque en muchos casos se puede contar con manifestaciones termales superficiales. Una acción para atender este reto estriba en mejorar las metodologías existentes de prospección geofísica, así como mejorar la sensibilidad y precisión de la detección de señales. Se considera, inclusive, que es factible innovar en estas metodologías. Otra acción considera mejorar también las técnicas geoquímicas de exploración, que permitan conocer más acerca de las propiedades de las rocas y fluidos o, inclusive, desarrollar nuevos geotermómetros y geobarómetros. Por ello, la última acción de este reto considera el desarrollo de métodos de procesamiento robusto de datos, tanto en el campo como en su posterior análisis interpretativo.

IMAGEN 16. MAPEO DE RECURSOS GEOTÉRMICOS



FUENTE: Best practices guide for geothermal exploration, IGA 201

b) Disponer de metodologías integrales e innovadoras de exploración para el mapeo de recursos geotérmicos potenciales

Fecha de inicio: 2017 Fecha de terminación: 2022

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Fomentar la presentación de propuestas de proyectos de investigación exploratoria (avaladas por un desarrollador de la industria) que empleen metodologías integrales y/o de innovación (integración de diferentes metodologías de exploración e innovación de existentes o desarrollo de nuevas).	60 meses	SENER CFE y Grupo Dragón (Industria). CEMIE-Geo Centros de Investigación y Universidades
Divulgar los resultados obtenidos de estos proyectos.	Continuo	CEMIE-Geo Centros de Investigación y Universidades

Otra manera de reducir la incertidumbre en la exploración de recursos es hacer uso de diferentes métodos e integrar sus resultados. Así, una de las acciones contempladas en la atención de este reto considera fomentar la integración de diferentes métodos en los trabajos de exploración. Esto puede ser a través de la realización de proyectos de investigación sobre los diferentes métodos de exploración, así como las diversas formas de integración. Asimismo, se considera que es factible innovar tanto en algún método en particular, como en la manera de integrar los resultados de diferentes métodos. Por otra parte, será preciso difundir los resultados de estos proyectos a fin de generar experiencia colectiva sobre las diversas formas de integración, así como para que se conozcan las posibles innovaciones a los métodos de exploración.

c) Reducir costos, riesgos e incertidumbre en la perforación

Fecha de inicio: 2017. Fecha de terminación: 2022.

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Desarrollar proyectos que permitan probar técnicas novedosas de perforación.	60 meses	CEMIE-Geo Centros de Investigación y Universidades CFE y Grupo Dragón (Industria).
Implementar mecanismos de vinculación entre la academia y la industria para identificar y solucionar problemas de perforación experimentados por la industria.	60 meses	CEMIE-Geo Centros de Investigación y Universidades CFE y Grupo Dragón (Industria).

La perforación involucra una parte sustancial del presupuesto de los proyectos geotérmicos, de tal manera que enfocar esfuerzos para abatir costos y riesgos en esa etapa puede redundar en una mejor rentabilidad de este tipo de proyectos. Una primera acción para atender este reto considera efectuar proyectos de investigación tendientes a desarrollar y probar técnicas novedosas de perforación. La innovación puede encaminarse, por ejemplo, a lograr una mayor durabilidad en las barrenas y mayores velocidades de perforación; también, a experimentar con nuevas sustancias en los lodos de perforación a fin de evitar entradas o pérdidas de fluido. Además, a fin de incrementar la efectividad de la investigación aplicada, será conveniente buscar mecanismos de vinculación entre la academia y la industria, a efecto de identificar y solucionar los problemas experimentados por la industria en la etapa de perforación.

IMAGEN 17. PERFORACIÓN

FUENTE: ESMAP, Manual de geotermia: cómo planificar y financiar la generación de electricidad, 2012.

d) Optimizar el aprovechamiento energético a nivel de la planta

Fecha de inicio: 2017. Fecha de terminación: 2020.

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Realizar simulaciones numéricas de transferencia de calor y transporte de fluidos en el sistema de producción para establecer propuestas de optimización energética.	36 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i
Diseñar plantas que permitian el uso en cascada del recurso para aumentar la eficiencia general de su aprovechamiento.	36 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria).
Diseñar intercambiadores de calor más eficientes y generar fluidos secundarios más estables y menos tóxicos y costosos (plantas de ciclo binario).	24 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria).
Fomentar el uso en cascada del recurso para aumentar la eficiencia general de su aprovechamiento.	24 meses	SENER CFE y Grupo Dragón (Industria).

Para la atención de este reto, una primera acción consiste en impulsar la realización de simulaciones numéricas de transferencia de calor y transporte de fluidos en todo el sistema de producción, con lo cual se podrían estudiar propuestas de optimización energética. Para ello será fundamental el interés y la participación de los desarrolladores y concesionarios, pues son quienes se beneficiarían con esta acción. Otra medida para optimizar el aprovechamiento sería trabajar en el diseño de intercambiadores de calor más eficientes, así como en la creación de fluidos secundarios más estables, con menores temperaturas de ebullición y menos tóxicos y costosos para el caso de plantas binarias.

La disminución del punto de ebullición en los fluidos secundarios, que se utilizan en las plantas binarias, impacta en un mayor aprovechamiento energético de los recursos de mediana entalpía. Por último, una medida más consiste en fomentar el uso de los recursos con procesos en cascada. Ello permitiría aprovechar el fluido residual después de un primer ciclo de flash mediante procesos acordes con su temperatura.

e) Mejorar el desarrollo de proyectos de colaboración industria y academia

Fecha de inicio: En operación. Fecha de terminación: 2020.

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Establecer mecanismos formales de comunicación con la industria.	12 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria).
Realizar estudios con la industria para la identificación de los problemas existentes.	12 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria).

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Fomentar la creación foros de difusión relacionados con los mecanismos de acceso a fondos de financiamiento.	6 meses	CONACYT. Fondo de Sustentabilidad energética. SENER
Promover la colaboración entre academia e industria para elegir proyectos de investigación y desarrollo tecnológico enfocados en la solución de problemas.	12 meses	CONACYT. Fondo de Sustentabilidad energética. CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria).
Desarrollar proyectos enfocados en resolver los problemas identificados con la participación de expertos (tecnólogos/investigadores).	Continuo	CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria).
Divulgar los resultados de los proyectos.	Continuo	CEMIE-Geo, CoIDT+i

Uno de los aspectos observados durante el desarrollo del mapa de ruta, es el hecho de que en el país prevalece una desvinculación entre los esfuerzos que realiza la academia y las necesidades de la industria. Por lo cual, este reto considera la realización de una serie de acciones encaminadas a fortalecer esta vinculación. En primera instancia, se deberán establecer mecanismos formales de comunicación entre la industria y la comunidad de instituciones de educación superior, para mejorar su colaboración. Una vez logrado lo anterior, se podrán realizar estudios conjuntos que permitan una clara identificación de las necesidades de la industria para dirigir los esfuerzos y recursos a satisfacerlas.

Una tercera acción establece la generación de instrumentos de comunicación que permitan vincular las necesidades de la industria con los fondos sectoriales, debido a que se observa que los mecanismos de acceso no han sido identificados adecuadamente por los distintos actores. Las acciones anteriores, permitirán que en un mediano plazo se puedan llevar a cabo proyectos conjuntos que fortalezcan la competitividad del sector.

Para lograr una mejor sinergia entre los diferentes actores se establece una acción para divulgar los resultados de los proyectos, con lo cual, además, se avanzaría en el conocimiento de casos reales.

IIb.- Recursos de baja entalpía

La generación de electricidad con recursos de baja entalpía comprende el aprovechamiento de recursos geotérmicos con temperaturas menores o iguales a 90°C y de recursos residuales provenientes de instalaciones petroleras, plantas industriales e inclusive plantas geotérmicas que operan con recursos de mayor temperatura. En México, este tipo de recursos no se aprovecha actualmente, pero se considera que los recursos residuales provenientes de instalaciones petroleras y de plantas geotérmicas e industriales son los que podrían utilizarse en el país a corto plazo.

Los retos señalados como prioritarios para aprovechar los recursos geotérmicos de baja entalpía comprenden dos vertientes. Por una parte, están los retos asociados a la identificación de sitios con recursos residuales que no están siendo utilizados, y por otra están los retos referentes a la optimización y solución de la problemática en las instalaciones necesarias. Se considera que la solución a todos estos retos puede lograrse con las capacidades técnicas ya existentes en México. En el horizonte 2017-2030 los resultados derivados de la atención de los retos no buscan generar propiamente electricidad, sino generar capacidades técnicas relevantes para el mejor aprovechamiento de este recurso. La tabla 4 indica los retos, así como los resultados esperados y las estrategias preferentes para su atención.

TABLA 4. PRINCIPALES RETOS PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD CON RECURSOS DE BAJA ENTALPÍA

Reto	Resultado esperado	Estrategia
Identificar el potencial de generación de energía eléctrica a partir de sitios de calor de baja entalpía que aún no están siendo aprovechados.	Inventario de sitios de calor de baja entalpía con potencial de generación de energía eléctrica, plantas geotérmicas, termoeléctricas e instalaciones petroleras. Criterios técnico-económicos para la determinación del potencial de generación de electricidad. Estudios de factibilidad técnico-económica de sitios seleccionados.	Desarrollar conocimiento y herramientas propias que permitan localizar y caracterizar los sitios de calor de baja entalpía, así como el potencial de generación de energía eléctrica.
Optimizar costo-beneficio de sistemas de generación binarios.	Métodos para el diseño de intercambiadores de calor eficientes. Fluidos de trabajo apropiados para el aprovechamiento de recursos de baja temperatura, que sean estables durante la operación y de bajo costo. Métodos de trabajo para la simulación y optimización de la operación de sistemas de generación binarios.	Desarrollar y/o asimilar conocimiento que permita optimizar el costo-beneficio de plantas binarias a través de la colaboración con instituciones líderes (nacionales o internacionales) en estos temas.
Resolver problemas de incrustaciones en sistemas de generación binarios.	Modelos y herramientas para la simulación de mecanismos de precipitación que tomen en cuenta los fenómenos de nucleación. Métodos de trabajo más eficientes para remover precipitaciones e incrustaciones. Materiales o recubrimientos que reduzcan los fenómenos de nucleación de incrustaciones. Métodos para prevenir incrustaciones y corrosión en componentes clave (ej. bombas, intercambiadores de calor y tuberías).	Desarrollar conocimiento propio que permita identificar las causas de incrustaciones y elegir soluciones efectivas.

A continuación, se presentan las acciones, tiempo estimado para su realización y los participantes clave para cada uno de los retos tecnológicos considerados.

a) Identificar el potencial de generación de energía eléctrica a partir de sitios de calor de baja entalpía que aún no están siendo aprovechados.

Fecha de inicio: 2017 Fecha de Terminación: 2019

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Identificar sitios con calor residual en la industria petrolera, geotérmica y plantas termoeléctricas con potencial para la generación de energía eléctrica.	24 meses	SENER CONAGUA CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE, Grupo Dragón, Petróleos Mexicanos y otras empresas del sector petrolero (Industria).
Actualizar el inventario de manifestaciones termales superficiales del país.	48 meses	SENER CEMIE-Geo, CoIDT+i
Realizar la caracterización físico-química y termodinámica de los fluidos aprovechables.	12 meses	SENER CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE, Grupo Dragón, Petróleos Mexicanos y otras empresas del sector petrolero (Industria).
Realizar estudios de factibilidad técnico-económica que comprendan el uso de tecnologías de última generación.	12 meses	SENER CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE, Grupo Dragón, Petróleos Mexicanos y otras empresas del sector petrolero (Industria).

La atención de este reto comprende cuatro acciones principales. La primera de ellas tiene que ver con la identificación de sitios con fluidos térmicos residuales en operaciones industriales de sectores como la geotermia y explotación petrolera. Usualmente, las operaciones de estos sectores generan agua con calor residual y temperaturas superiores a los 85°C, que podrían ser aprovechadas para generar electricidad mediante el uso de sistemas de generación binarios. La segunda acción se refiere a la actualización del inventario de las manifestaciones termales superficiales existentes en el país (Ver imagen 18), ya que el inventario actual se compiló hace décadas.

IMAGEN 18. MANIFESTACIONES TERMALES SUPERFICIALES

FUENTE: Página WEB http://ohotart.16mb.com/uncategorized/las-aguas-termales-manifestaciones-desde-el-subsuelo-en-la-region-zuliana/

La tercera acción está enfocada en la caracterización físico-química y termodinámica de los fluidos, con el propósito de definir criterios técnico-económicos para la determinación del potencial de generación de electricidad. Finalmente, la última acción se orienta hacia la realización de estudios de factibilidad técnico-económica de proyectos para el aprovechamiento del recurso en sitios seleccionados. Los estudios deben considerar las tecnologías de última generación que toman en cuenta diseños optimizados y la solución a problemas operativos frecuentes en plantas binarias (ejemplo: precipitación e incrustación). La atención a este reto puede iniciarse de manera inmediata, en cuyo caso se podrían alcanzar avances importantes para el año 2019, con la participación del CEMIE Geo, Centros de Investigación y Desarrollo Tecnológico y actores de la industria (como podría ser Comisión Federal de Electricidad y Petróleos Mexicanos u otras empresas del sector eléctrico o petrolero). La SENER se considera como un actor relevante para impulsar la realización de estas acciones.

Al final se espera contar con conocimiento y herramientas propias que permitan localizar y caracterizar los sitios de calor de baja entalpía, así como evaluar el potencial de generación de energía eléctrica.

b) Optimizar costo-beneficio de sistemas de generación binarios

Fecha de inicio: 2017 Fecha de terminación: 2020

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Desarrollar métodos de diseño de intercambiadores de calor que incrementen su eficiencia.	36 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria). SENER
Desarrollar fluidos de trabajo menos costosos y más estables.	36 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i SENER
Asimilar el conocimiento alcanzado en otros países en relación a la optimización de la operación de sistemas de generación binarios.	36 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i SENER

La atención de este reto implica dar solución a problemáticas observadas en la operación de los sistemas de generación binarios que afectan su rentabilidad. La realización de un diagnóstico detallado del diseño y operación de plantas binarias existentes podría ofrecer información sobre oportunidades de mejora de estos sistemas. Sin embargo, de manera general, se identifican tres ámbitos en los que se podría mejorar su relación costo-beneficio, como son diseñar intercambiadores de calor más eficientes, desarrollar fluidos de trabajo, más estables y de menor costo, e identificar y seleccionar las condiciones de operación óptimas. En el primero de los casos, es necesario trabajar en el desarrollo de métodos de diseño de intercambiadores de calor que consideren los gradientes térmicos de estos sistemas y problemas típicos de la operación de plantas binarias como son la incrustación, ensuciamiento, corrosión, periodos de operación y mantenimiento, por citar algunos. Con relación a los fluidos de trabajo, es necesario contar con fluidos de mayor estabilidad, menores pérdidas por volatilidad y menor costo, que sean apropiados a los diseños de los equipos, a sus arreglos y a las condiciones de operación de la planta. Finalmente, la tercera acción establece la necesidad de asimilar el conocimiento alcanzado en otros países en relación a la optimización de la operación de plantas binarias, el cual podría incluir la definición de variables de operación utilizando herramientas de simulación y optimización.

IMAGEN 19. INTERCAMBIADORES DE CALOR DE PLANTAS GEOTÉRMICAS.

FUENTE: Garcia G.A 2011

La estrategia para la atención de este reto apunta al desarrollo de capacidades técnicas en el ámbito nacional, con la posible colaboración de instituciones líderes a nivel nacional e internacional en cada uno de los temas. Las actividades podrían iniciar de manera inmediata una vez que se obtengan los recursos económicos necesarios, que de estar disponibles en el corto plazo, podrían resultar en avances significativos para el año 2020. Los actores involucrados en la atención de este reto incluyen al CEMIE Geo y demás integrantes de la CoIDT+i, CFE y Grupo Dragón (industria) y organismos reguladores.

c) Resolver problemas de incrustaciones en sistemas de generación binarios.

Fecha de inicio: 2017 Fecha de terminación 2020

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Desarrollar y aplicar modelos numéricos para simular la dinámica de precipitación tomando en cuenta los fenómenos de nucleación.	24 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i
Desarrollar métodos de mantenimiento que prevengan corrosión e incrustaciones.	18 meses	CFE y Grupo Dragón (Industria). CEMIE-Geo, CoIDT+i
Desarrollar métodos (químicos, térmicos, mecánicos) más eficientes de desintegración de incrustaciones.	24 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria).
Desarrollar materiales que reduzcan los fenómenos de nucleación de incrustaciones.	36 meses	CEMIE-Geo CoIDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria).

La primera acción considerada para la atención de este reto es la generación de conocimiento que incluya modelos y herramientas de simulación que permitan entender la dinámica de la precipitación de sales, tomando en cuenta los fenómenos de nucleación que provocan la incrustación en tuberías y equipos de proceso clave de las plantas binarias. La segunda de las acciones está orientada a desarrollar métodos que prevengan la formación de incrustaciones y disminuir la corrosión, los cuales consideren las condiciones de operación específicas, las características de los fluidos existentes, así como los materiales de las tuberías y equipos de proceso. Un elemento importante a considerar en esta acción es el tratamiento de los fluidos existentes en la planta. La tercera acción consiste en desarrollar técnicas de mantenimiento correctivo más eficientes a las existentes para eliminar las incrustaciones, haciendo uso de métodos químicos, térmicos, mecánicos y/o una combinación de estos. Tales métodos, además, deben estar orientados a disminuir los tiempos de mantenimiento y sus costos. Finalmente, la cuarta acción sugiere el desarrollo de nuevos materiales de tuberías y equipos clave de proceso, que reduzcan los fenómenos de nucleación de incrustaciones.

Al igual que la acción anterior, el resultado que se espera es la reducción de costos de operación y mantenimiento. La atención de las actividades de este reto está direccionada al desarrollo de

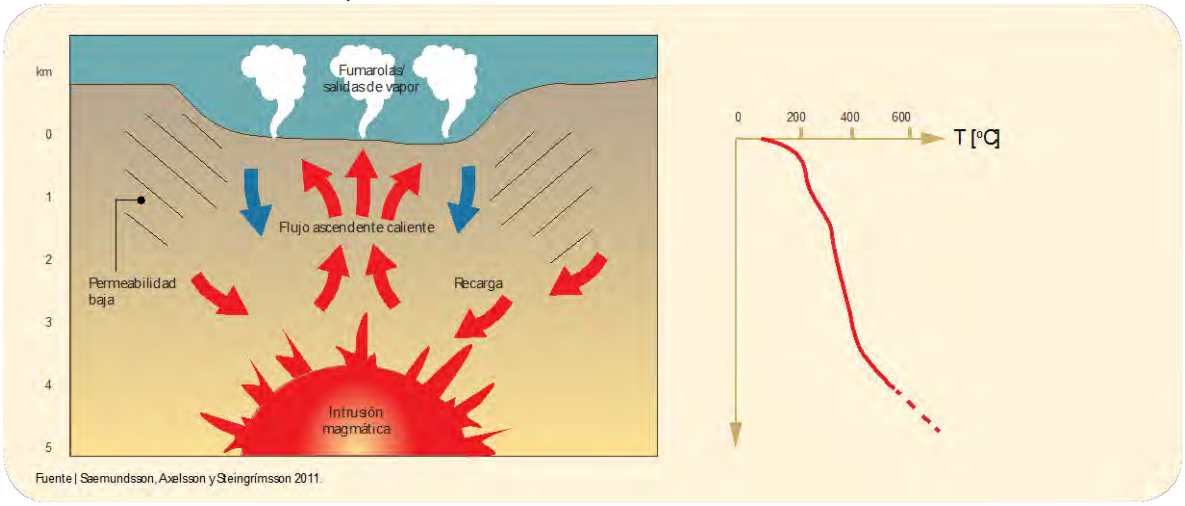
capacidades técnicas nacionales para entender el fenómeno de las incrustaciones, lo cual permitirá seleccionar, especificar y aplicar métodos preventivos y correctivos en materia de incrustaciones y corrosión. Para alcanzar el éxito en las acciones establecidas, es necesaria una participación estrecha de la industria con los centros de investigación. Las actividades podrían iniciar de manera inmediata una vez establecidos los mecanismos de interacción entre empresas y centros de investigación, pudiendo dar resultados en el corto plazo (2020).

IIc.- Recursos no convencionales: Súper calientes y roca seca caliente

Además de los recursos geotérmicos de tipo hidrotermal o también llamados convencionales, existen otros recursos a los que se les conoce como no convencionales. Entre estos podemos mencionar los súper calientes, hidrotermales submarinos, geopresurizados y de roca seca caliente. En este mapa de ruta se abordan únicamente los recursos súper calientes y de roca seca caliente. La generación de electricidad con estos recursos supone la solución de cinco retos prioritarios, lo que permitirá generar herramientas y capacidades técnicas necesarias para desarrollar las capacidades que permitan aprovecharlos. En términos generales, la estrategia para abordar estos retos incluye la colaboración de entidades mexicanas con entidades extranjeras que ya tienen experiencia en ellos. De hecho, en 2015 se lanzó una convocatoria para desarrollar un proyecto de investigación y desarrollo tecnológico, para crear y aplicar conocimiento y tecnologías en el campo de los Sistemas Geotérmicos Avanzados (EGS, por sus siglas en inglés, *Enhanced Geothermal Systems*) y de los Sistemas Geotérmicos Súper calientes (SHGS, por sus siglas en inglés, *Super-Hot Geothermal Systems*), en cooperación entre México y la Unión Europea. El proyecto que resultó ganador en la convocatoria es el denominado GEMex, el cual inició oficialmente en un par de reuniones realizadas en noviembre de 2016 en Morelia, Mich., y en la Ciudad de México. GEMex ejecutará de una serie de sub-proyectos de exploración y explotación en dos áreas geotérmicas ubicadas en el estado de Puebla (Acoculco y el campo geotérmico de Los Humeros) cuya concesión de explotación y permiso de exploración fueron asignados a la Comisión Federal de Electricidad, respectivamente. La tabla 5 señala los principales retos identificados, que deberán ser atendidos para aprovechar estos dos tipos de recursos geotérmicos no convencionales en el país.

En el horizonte 2017-2030, los resultados derivados de la atención de los retos no buscan generar electricidad, sino generar capacidades técnicas relevantes para poder implementar en el futuro ambas tecnologías en el territorio nacional.

IMAGEN 20. SISTEMAS GEOTÉRMICOS SÚPER CALIENTES (SHGS, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS, SUPER-HOT GEOTHERMAL SYSTEMS)



FUENTE: ESMAP, Manual de geotermia: cómo planificar y financiar la generación de electricidad, 2012.

TABLA 5. PRINCIPALES RETOS PARA LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS NO CONVENCIONALES SÚPER CALIENTES Y DE ROCA SECA CALIENTE

Reto	Resultado esperado	Estrategia
Mejorar los modelos termodinámicos, fisicoquímicos y de simulación mediante la incorporación de estudios termodinámicos de procesos de interacción agua-roca.	Parámetros fisicoquímicos y termodinámicos, métodos y correlaciones para describir el comportamiento de los procesos de interacción agua-roca. Modelos de simulación para analizar el comportamiento termodinámico de interacción agua-roca.	Desarrollo de conocimiento y herramientas propias a través de la colaboración con entidades extranjeras (Proyecto GEMex).
Disponer de técnicas y materiales que permitan el aprovechamiento de los sistemas súper calientes, y resolver los problemas de corrosión-erosión.	Revestimientos de diafragmas y álabes de turbinas que prevengan incrustaciones. Técnicas para acondicionar fluidos con el propósito de reducir corrosión y erosión en tuberías y equipos. Materiales apropiados que soporten las condiciones de operación presentes en estos procesos.	Desarrollar soluciones en alianza con entidades extranjeras para habilitar la explotación de sistemas súper calientes (Proyecto GEMex).
Desarrollar modelos termodinámicos para el aprovechamiento de sistemas súper calientes.	Instrumentos para medir las condiciones termodinámicas desde el fondo del pozo hasta el condensador. Herramientas de simulación termodinámica de los sistemas. Procedimientos, métodos de trabajo y simuladores para optimizar el aprovechamiento de estos sistemas.	Desarrollar soluciones en alianza con entidades extranjeras para habilitar la explotación de sistemas súper calientes (Proyecto GEMex).
Desarrollar y mejorar técnicas de exploración de sistemas con baja permeabilidad y sin manifestaciones hidrotermales en superficie	Métodos geológicos, geofísicos y geoquímicos enfocados a la detección de alta temperatura y baja permeabilidad en el subsuelo.	Desarrollo de conocimiento y ensayo de soluciones en alianza con países líderes en el tema, a través de colaboración internacional (Proyecto GEMex).
Desarrollar metodologías ambientalmente aceptables para generar permeabilidad secundaria en los sistemas de roca seca caliente	Procedimientos para la estimulación del fracturamiento mediante tecnología amigable con el ambiente.	Desarrollo de conocimiento y ensayo de soluciones en alianza con países líderes en el tema, a través de colaboración internacional (Proyecto GEMex).

A continuación se presentan las acciones, tiempo estimado para su realización y los participantes clave para cada uno de los retos tecnológicos considerados.

a) *Mejorar los modelos termodinámicos, fisicoquímicos y de simulación mediante la incorporación de estudios termodinámicos de procesos de interacción agua-roca*

Fecha de inicio: en operación. Fecha de terminación: 2019.

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Desarrollar pruebas de laboratorio para definir parámetros fisicoquímicos y termodinámicos.	36 meses	CEMIE-Geo, ColDT+i
Desarrollar o adaptar simuladores numéricos a partir de los parámetros definidos.	24 meses	CEMIE-Geo, ColDT+ SENER CFE y Grupo Dragón (Industria).

Para abordar este reto se identifican dos acciones consideradas como prioritarias. Por una parte, se señala que es necesario desarrollar pruebas de laboratorio para definir parámetros fisicoquímicos y termodinámicos, métodos y correlaciones requeridos para describir el comportamiento de los procesos de interacción agua-roca. En complemento, se requiere del desarrollo o adaptación de simuladores numéricos de procesos termodinámicos, para el cálculo de los parámetros del recurso geotérmico, tanto a condiciones de yacimiento como a condiciones de superficie, aspecto muy importante en la planeación y el diseño de la explotación de los recursos geotérmicos. Estas acciones se pueden desarrollar en colaboración con entidades extranjeras en el marco de convenios internacionales en los que participa México, como lo es el programa para la investigación e innovación Horizon 2020, impulsado por la Comunidad Europea. De hecho, ya se encuentra en ejecución el Proyecto GEMex, de investigación conjunta entre México y países de la Comunidad Europea en materia de geotermia, para EGS y SHGS. Bajo este contexto, el reto puede empezar a ser atendido en el corto plazo y lograr resultados relevantes hacia el año 2020.

En la realización de estas acciones se visualiza primordialmente la participación del sector académico (centros de investigación y desarrollo y universidades), así como entidades gubernamentales a través de la generación de esquemas que promuevan la cooperación con entidades internacionales y que sirvan como enlace durante su operación.

b) *Disponer de técnicas y materiales que permitan el aprovechamiento de los sistemas súper calientes, y resolver los problemas de corrosión-erosión*

Fecha de inicio: 2016 Fecha de terminación: 2019

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Realizar investigación en revestimiento de diafragmas y álabes de turbinas que eviten incrustaciones.	24 meses	CEMIE-Geo, ColDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria).

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Realizar investigación en técnicas de manejo de los fluidos.	24 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria).
Seleccionar, adaptar o desarrollar materiales apropiados en condiciones de alta temperatura y acidez.	36 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria).

La atención de este reto comprende tres vertientes para la solución a problemas de corrosión-erosión de sistemas súper calientes, que son el desarrollo de revestimientos, creación de técnicas para el acondicionamiento de fluidos y la investigación de materiales. La primera tiene como propósito inhibir o minimizar el daño causado por incrustaciones en diafragmas y álabes de las turbinas, mediante la investigación de materiales para el desarrollo de revestimientos y aleaciones especiales para estas piezas. La segunda vertiente, se enfoca en la investigación y el desarrollo de técnicas y productos para el acondicionamiento de los fluidos geotérmicos, con el objetivo de minimizar la corrosión y erosión en tuberías y equipos. Finalmente, la tercera vía se enfoca en la investigación y el desarrollo de materiales para el diseño y construcción de los sistemas de conducción y almacenamiento de fluidos, apropiados para las condiciones de alta temperatura y acidez que caracterizan a los fluidos súper calientes.

Al igual que en el reto a) *Mejorar los modelos termodinámicos, fisicoquímicos y de simulación mediante la incorporación de estudios termodinámicos de procesos de interacción agua-roca*, estas acciones se pueden desarrollar en colaboración con entidades extranjeras, con experiencia en el tema, en el marco de convenios internacionales en los que participa México, particularmente el Proyecto GEMex. La atención de este reto podría abarcar un periodo de tres años, por lo que para el año 2020 se podrían alcanzar avances importantes siempre y cuando se inicien acciones en el año 2017. La atención del reto involucraría la participación de diferentes actores de la industria, academia y gobierno.

c) Desarrollar modelos termodinámicos para el aprovechamiento de sistemas súper calientes

Fecha de inicio: 2017 Fecha de terminación: 2019

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Desarrollar simuladores numéricos para simular las condiciones físico-químicas desde el fondo del pozo hasta el condensador.	24 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria). SENER
Seleccionar los ciclos termodinámicos más adecuados para el aprovechamiento óptimo del recurso.	24 meses en paralelo	CEMIE-Geo, CoIDT+i CFE y Grupo Dragón (Industria). SENER

El tercero de los retos identificados está vinculado con el desarrollo de modelos termodinámicos para el aprovechamiento de sistemas súper calientes. Su atención implica dos acciones consideradas como prioritarias.

En primer lugar, es necesario desarrollar simuladores que permitan predecir las variaciones de las propiedades termodinámicas del recurso geotérmico, en su transporte del yacimiento a la superficie. Además de sus propiedades, las simulaciones numéricas pueden permitir estimar el tipo y cantidades de los componentes (fases del fluido, sales y sustancias no condensables) de la mezcla geotérmica, y las posibles variaciones de las propiedades termodinámicas del recurso geotérmico, en su trayecto del yacimiento a la superficie.

En segundo lugar, se requiere realizar también simulaciones numéricas de las propiedades físico-químicas, con distintos ciclos termodinámicos de producción, para seleccionar el que brinde mejores resultados para el aprovechamiento óptimo del recurso geotérmico. Una de las causas principales que genera bajos factores de planta, al operar con fluidos de condiciones extremas (como los fluidos súper calientes), es la falta de predicción del comportamiento termodinámico a lo largo del sistema de producción. De ahí que las simulaciones numéricas (y experimentales) y los procedimientos de trabajo para la aplicación de sus resultados, son fundamentales para el diseño y la operación de plantas geotérmicas que puedan operar con recursos súper calientes.

Al igual que en el reto *b) Disponer de técnicas y materiales que permitan el aprovechamiento de los sistemas súper calientes, y resolver los problemas de corrosión-erosión,* estas acciones se pueden desarrollar en colaboración con entidades extranjeras, que tengan experiencia probada, en el marco de convenios internacionales en los que participa México. La atención de este reto podría abarcar un periodo de dos años, por lo que para el año 2019 se podrían alcanzar avances importantes, siempre y cuando se inicien acciones en el año 2017. La atención del reto involucraría tanto la participación de la academia como de la industria.

d) Desarrollar y mejorar técnicas de exploración de sistemas con baja permeabilidad y sin manifestaciones hidrotermales en superficie

Fecha de inicio: 2017 Fecha de terminación: 2020

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Realizar simulaciones numéricas de la respuesta geofísica y geoquímica de sistemas con baja permeabilidad y alta temperatura.	36 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i
Realizar pruebas de sensibilidad de nuevas metodologías de prospección o de combinaciones de métodos actuales.	36 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i

La baja permeabilidad de los recursos de roca seca caliente impide que estos tengan manifestaciones superficiales, lo que dificulta su identificación. Mejorar el conocimiento de las propiedades que pueden medirse en este tipo de recursos ayudaría a innovar o mejorar los métodos de prospección aplicados a ellos. Una manera de acercarse a este conocimiento es mediante la simulación numérica de las probables respuestas geofísicas y geoquímicas de este tipo de recursos.

Esto ayudaría a implementar una segunda acción, que consiste en el desarrollo de nuevos métodos de prospección, en la generación de innovaciones en los que existen actualmente, o bien, en encontrar combinaciones entre ellos para lograr los mejores resultados. Estas acciones representan áreas de oportunidad en investigación aplicada que pueden aprovechar los centros de investigación, tanto públicos como privados, en especial, los que constituyen el CEMIE Geo.

e) Desarrollar metodologías ambientalmente aceptables para generar permeabilidad secundaria en los sistemas de roca seca caliente

Fecha de inicio: 2017 Fecha de terminación: 2020

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Realizar pruebas de laboratorio para caracterización de propiedades físicas de rocas asociadas con sistemas de roca seca caliente	36 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i

Un aspecto crucial de los recursos de roca seca caliente es hacerlos económicamente explotables. Los recursos geotérmicos más abundantes son justamente los de roca seca caliente, que se pueden aprovechar con EGS, la cual está aún en su fase demostrativa con proyectos prototipo.

La tecnología EGS se basa en estimular y mejorar la permeabilidad de las rocas del subsuelo mediante la inducción de su fracturamiento. Estás técnicas pueden ser hidráulicas, térmicas, químicas o una combinación de ellas, y bajo ciertas condiciones pueden representar riesgos al

ambiente como cuando se emplean sustancias que podrían contaminar los acuíferos, o cuando se produce sismicidad asociada al fracturamiento de la roca.

Es lógico suponer que tener un buen conocimiento de las rocas de subsuelo asociadas con estos recursos, que son generalmente de tipo intrusivo (rocas graníticas), permitirá un mejor desarrollo de las técnicas necesarias para su fracturamiento y eventual aprovechamiento de su energía térmica. Una acción enfocada para acercarse a este conocimiento es mejorar la caracterización de las propiedades físicas de esas rocas, con base en pruebas de laboratorio.

Se espera que este conocimiento ayude en la determinación de los métodos, sustancias y herramientas ambientalmente aceptables para generar la permeabilidad secundaria en los patrones apropiados y poder producir así un sistema geotérmico mejorado. Además, será necesario implementar técnicas de monitoreo de las posibles repercusiones ambientales asociadas. Al igual que en el reto anterior, estas acciones también representan áreas de oportunidad que pueden aprovechar los centros de investigación y desarrollo tecnológico.

Desarrollo de la geotermia en México: Usos directos del calor

I. Visión al 2030

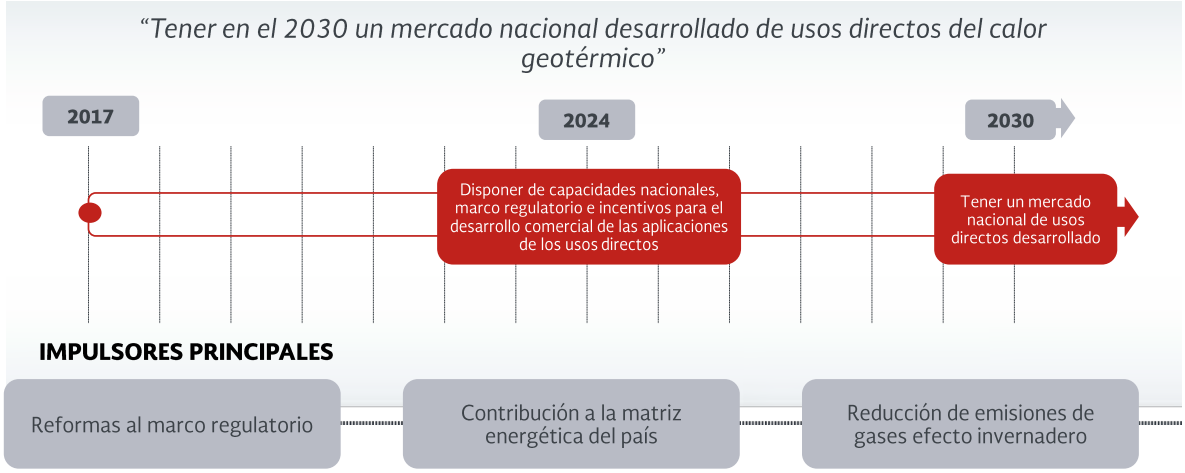
Los usos directos del calor geotérmico se han empleado desde hace mucho tiempo en otros países para diversas aplicaciones entre las que se encuentran la calefacción urbana, de espacios habitacionales e invernaderos, los balnearios, secado agrícola y de alimentos, desalinización de agua, piscicultura y uso de calor en procesos industriales.

En nuestro país el empleo de estas aplicaciones es prácticamente incipiente, porque se ha limitado a balnearios y spas con fines recreativos y en algunos casos terapéuticos. De manera demostrativa, en los campos Los Azufres en Michoacán, y Los Humeros en Puebla, la CFE en colaboración con el INEEL, implementó proyectos prototipos de secado de madera, deshidratación de alimentos, producción de hongos comestibles y calefacción de espacios. De ellos, sólo este último sigue utilizándose en el campo de Los Azufres.

Existe un mercado de oportunidades para los usos directos del calor geotérmico en México, económicamente viables, sobre todo en las áreas con climas extremos. Sin embargo, actualmente no existen mecanismos que incentiven el desarrollo de este mercado.

La visión para el desarrollo de los usos directos del calor geotérmico al 2030 que se plantea en este mapa de ruta, parte del estado en el que se encuentra actualmente este mercado en el país y por lo tanto no se establecen metas específicas. De esta forma, la visión que se plantea es **tener en el 2030 un mercado nacional desarrollado de usos directos del calor geotérmico.**

Figura 3. Visión para el desarrollo de la energía geotérmica al 2030 en usos directos de calor



Enfoque

De las diversas aplicaciones que tienen los usos directos del calor geotérmico, en este mapa de ruta se analizan aquellas que tienen mayor viabilidad de explotación comercial y demanda potencial en el país, mismas que son:

- Calefacción/Enfriamiento por bombas de calor.
- Deshidratación de alimentos.
- Usos industriales.

Dentro de la categoría de usos industriales se encuentran agrupadas las siguientes aplicaciones: calefacción de piscinas, precalentamiento para procesos industriales, recuperación de minerales de salmueras geotérmicas, piscicultura-acuicultura, secado de productos, y fabricación de papel, principalmente.

Los recursos que se consideran aprovechables para este tipo de aplicaciones son los de baja entalpía.

IMAGEN 21. CALEFACCIÓN DE ESPACIOS

FUENTE: Página WEB http://www.araosguzman.org/2011/08/energia-geotermica-vivienda.html

Estrategia

El desarrollo del mercado de usos directos del calor en nuestro país se considera factible, pero depende en gran medida de la implementación de acciones para incentivarlo, así como de establecer una regulación específica y simplificada para estos usos. La estrategia que se visualiza para el desarrollo de las capacidades nacionales que se requieren para promover la industria de los usos geotérmicos en México, está en línea con la madurez de estas tecnologías a nivel internacional, su disponibilidad comercial y costo.

Por lo tanto, la estrategia preferente a seguir es la asimilación de la tecnología ya existente que permita acelerar su incorporación y desarrollo en nuestro país, y en un futuro, reducir la dependencia tecnológica, si esta llegara a ocurrir.

Actualmente ya existen algunas capacidades en usos geotérmicos directos, que consisten principalmente en especialistas que pueden llevar a cabo estudios técnicos y económicos, así como proyectos demostrativos que permitan valorar la viabilidad de las aplicaciones de mayor demanda potencial. Sin embargo, es necesario fortalecer esas capacidades para que en el corto y mediano plazo, México pueda contar con especialistas para el de diseño, operación y mantenimiento de instalaciones comerciales.

II. Implementación de la visión

De manera adicional a la generación de electricidad con recursos geotérmicos, la energía de baja y mediana entalpía puede ser aprovechada en sistemas de transferencia de calor en aplicaciones agrupadas con el nombre genérico de Usos Directos. Como ya ha sido comentado, este mapa de ruta considera tres aplicaciones prioritarias de los usos geotérmicos directos: calefacción/enfriamiento con bombas de calor; deshidratación de alimentos (Ver imágenes 21 y 22) y aprovechamiento del calor en usos industriales.

IMAGEN 22. DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS

FUENTE: http://tecreview.itesm.mx/investigadora-del-tec-desarrolla-proceso-para-deshidratar-alimentos/

En términos generales, se considera que la tecnología para los usos directos se encuentra madura a nivel mundial, por lo que la estrategia preferente para su despliegue a nivel nacional, es

su asimilación e implementación local y el desarrollo de capacidades tecnológicas en ingeniería que permitan la construcción de las aplicaciones de usos directos y su operación eficiente, apoyándose en un conocimiento detallado del inventario de recursos geotérmicos de baja entalpía que pueden ser aprovechados. Todo ello puede hacerse empleando recursos humanos y económicos principalmente nacionales.

En la tabla 6 se presentan los principales retos identificados que deberán ser atendidos para aprovechar los recursos geotérmicos de baja entalpía para usos directos, los cuales son comunes para las tres aplicaciones consideradas: calefacción/enfriamiento por bombas de calor, deshidratación de alimentos, y usos industriales.

TABLA 6. RETOS TECNOLÓGICOS PRIORITARIOS PARA LOGRAR EL OBJETIVO AL 2030 EN USOS DIRECTOS DEL CALOR

Usos directos del calor geotérmico
• Formar recursos humanos especializados para las aplicaciones de usos directos. • Desarrollar capacidades tecnológicas para el diseño y construcción de equipos e instalaciones comerciales para usos directos. • Localizar y evaluar recursos geotérmicos para los usos directos definidos como prioritarios.

En el horizonte 2017-2030 los resultados derivados de la atención de los retos tienen como propósito la generación de capacidades tecnológicas y de recursos humanos para el diseño, ingeniería, construcción y operación de instalaciones comerciales de usos directos de mayor impacto económico, social y tecnológico en el país.

En la tabla 7 se presentan los retos mencionados, los resultados que se esperan obtener de su solución y la estrategia preferente para su atención.

TABLA 7. RETOS TECNOLÓGICOS PRIORITARIOS PARA USOS DIRECTOS

Reto	Resultado esperado	Estrategia
Formar recursos humanos especializados para las aplicaciones de usos directos.	Diagnóstico de requerimientos de formación de recursos humanos en aplicaciones de usos directos seleccionadas. Plan de acción para la formación de recursos humanos. Recursos humanos formados en áreas clave de las aplicaciones de usos directos seleccionadas.	Desarrollar la formación de especialistas para las áreas prioritarias de las aplicaciones de usos directos seleccionadas tomando como base las necesidades nacionales y considerando la oferta de formación de instituciones de educación superior y de empresas de capacitación especializada, nacionales e internacionales; así como la vinculación con la industria.

Reto	Resultado esperado	Estrategia
Desarrollar capacidades tecnológicas para el diseño y construcción de equipos e instalaciones requeridas para usos directos.	Inventario de tecnologías susceptibles de ser aplicadas en México para los usos directos seleccionados. Metodologías y herramientas para diseño y construcción de equipo e instalaciones requeridas para usos directos seleccionados. Inventario de paquetes tecnológicos y servicios de ingeniería para atender las necesidades de diseño y construcción de equipo e instalaciones requeridas para usos directos seleccionados.	Desarrollar capacidades nacionales a partir de la asimilación de las tecnologías existentes y/o alianzas con compañías líderes en el área de los usos directos seleccionados.
Localizar y evaluar recursos geotérmicos para los usos directos definidos como prioritarios.	Inventario de sitios de calor de baja entalpía con potencial de aplicarse a los usos directos seleccionados. Criterios técnico-económicos para la determinación del potencial de aprovechamiento del calor geotérmico de baja entalpía en los usos directos seleccionados. Estudios de factibilidad técnico-económica de sitios seleccionados.	Desarrollar conocimiento y herramientas propias que permitan localizar y caracterizar los sitios de calor geotérmico de baja entalpía, así como el potencial de aprovechamiento en usos directos seleccionados.

A continuación se presentan las acciones, tiempo estimado para su realización y los participantes clave para cada uno de los retos tecnológicos considerados.

a) *Formar recursos humanos especializados para las aplicaciones de usos directos*

Fecha de inicio: 2017. Fecha de terminación: 2019.

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Identificar áreas de conocimiento en las que se requiere formar especialistas	12 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i
Identificar las Instituciones de Educación Superior y empresas que puedan formar recursos humanos	12 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Identificar el tamaño de la demanda de formación de los recursos humanos en las áreas de interés	12 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i
Implementar la formación de recursos humanos en las áreas de interés, considerando la vinculación con la industria	24 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i

Para abordar la solución de este reto tecnológico se proponen cuatro acciones prioritarias que deberán ser ejecutadas en un plazo de 36 meses: identificar áreas de conocimiento en las que se requiere formar especialistas; identificar instituciones que puedan formar recursos humanos especializados; identificar el tamaño de la demanda a atender; e implementar la formación de recursos humanos en las áreas de interés.

Las tres primeras acciones prioritarias sugeridas (1, 2 y 3), corresponden a actividades de diagnóstico y planeación y deben ser coordinadas por la SENER quien podrá mantener una visión integral de la problemática y de las soluciones. Estas acciones permitirán identificar áreas de necesidad de conocimiento tecnológico, instituciones (públicas y privadas, IES, Centros IDT y empresas) capaces de proporcionar el conocimiento requerido y la cantidad de recursos humanos que se requiere formar. Estas tres acciones deberán ejecutarse en paralelo, en un plazo de 12 meses y su fecha de inicio es inmediata. El tiempo de duración estimado no considera de manera explícita la concurrencia de recursos para su ejecución. Si bien la coordinación se le asigna a la SENER, los responsables de la ejecución serán el CEMIE-Geo, así como los Centros de IDT y Universidades vinculadas al área tecnológica de geotermia, instituciones que cuentan con las capacidades para realizar este tipo de estudios.

Los resultados de estas tres acciones serán insumos para la integración, implementación y ejecución del plan de formación de especialistas de alto nivel en geotermia (acción 4). Esta acción deberá ser coordinada por el CEMIE-Geo y ejecutada por las IES y Centros de Investigación y Desarrollo Tecnológico, ya sean pertenecientes, o no, al CEMIE, El periodo de duración de esta actividad es de 24 meses, debido al tiempo requerido para aprobar y consolidar los contenidos(currícula y cartas descripctivas) Esta acción dará inicio al concluir las acciones 1, 2, 3, pero su consolidación transciende los meses indicados por lo que se considera como una acción que se realizará de manera continua.

La vinculación se visualizó como una actividad de gran importancia, en este caso para integrar los esfuerzos de formación de recursos humanos en las IES, Centros IDT y empresas de capacitación, con las necesidades del sector industrial de geotermia. Se considera que esta actividad forma parte de la acción 4, integración, implementación y ejecución del plan de formación de recursos humanos.

b) *Desarrollar capacidades tecnológicas para el diseño y construcción de equipos e instalaciones comerciales requeridas para usos directos*

Fecha de inicio: 2017 Fecha de terminación: 2020

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Identificar las tecnologías para las aplicaciones de usos directos con demanda en México.	12 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i Proveedores de equipos, productos y servicios (Industria)
Diseñar e implementar procesos de asimilación y transferencia de tecnologías seleccionadas. (Nota 1).	24 meses (Nota 2)	CEMIE-Geo, CoIDT+i SENER Proveedores de equipos, productos y servicios (Industria)
Desarrollar una cartera de paquetes tecnológicos y servicios de ingeniería para el diseño y construcción de equipos e instalaciones requeridas para usos directos.	12 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i SENER Proveedores de equipos, productos y servicios (Industria)

Nota 1: La acción considera el diseño e implantación de procesos de asimilación orientados al desarrollo de métodos de trabajo y herramientas para el diseño y construcción de equipos e instalaciones requeridas para usos directos.

Nota 2: Debido a la falta de certeza sobre el número de aplicaciones de usos directos y del número de tecnologías que serán trabajadas, el tiempo estimado se basa en solo una de las aplicaciones consideradas. Adicionalmente, hay que tomar en cuenta que otras aplicaciones pueden realizarse de manera paralela en caso de requerirse.

La atención de este reto comprende la ejecución de tres acciones prioritarias que se extienden en un plazo de 48 meses como mínimo.

Debido a la gran variedad de aplicaciones de usos directos de la energía geotérmica, la primera acción, consiste en identificar y cuantificar las aplicaciones que tendrían la mayor demanda en México y sean factibles técnica y económicamente de aplicarse (aún dentro de las tres aplicaciones seleccionadas). Esta acción involucra la realización de estudios del estado del arte de las tecnologías aplicables en México y de estudios competitivos para identificar a los proveedores potenciales.

La actividad debe iniciarse de manera inmediata. El tiempo de duración estimado no considera de manera explícita la concurrencia de recursos para su aplicación. Debido a que se trata de una actividad de diagnóstico y planeación se considera que la SENER tiene que ser el organismo coordinador, en tanto que el CEMIE-Geo y la industria serían los responsables de la ejecución de los estudios correspondientes.

La segunda acción, diseño e implementación de los procesos de asimilación y transferencia de tecnología seleccionada, considera la realización de tres etapas principales. En la primera etapa, debido a que se considera que la tecnología para estas aplicaciones es madura, se parte de la necesidad de contar con procesos de asimilación de tecnología que retomen las mejores prácticas, es decir, es una actividad cuyas capacidades tecnológicas se centran en metodologías y procedimientos de trabajo. La segunda etapa consiste en la difusión de la tecnología. Esta etapa no solo implica la comunicación y promoción de la tecnología, sino además contar con modelos de negocio que permitan llevar las soluciones tecnológicas a la comercialización y aplicación en instalaciones industriales, así como contar con capacidades tecnológicas específicas, de

conocimiento, métodos de trabajo e infraestructura.

La tercera etapa, consistente en el fortalecimiento de capacidades de ingeniería y construcción, va dirigida a las empresas privadas existentes, aunque no de manera exclusiva. Esta etapa debe estar vinculada con la acción 1 (Identificar las tecnologías para las aplicaciones de usos directos con demanda en México), ya que el fortalecimiento y/o creación de nuevas empresas de ingeniería y construcción estará basada en el tamaño de mercado que se deba atender. Es una actividad que depende principalmente de la Industria e implica desarrollar capacidades tecnológicas de conocimiento, métodos de trabajo e infraestructura.

El diseño e implementación de los procesos de asimilación y transferencia de tecnología seleccionada (acción 2) debe iniciarse una vez concluida la identificación de tecnologías (acción 1) y podrán tenerse resultados a partir de los dos años. Es necesario tomar en cuenta que debido a la falta de certeza sobre el número de aplicaciones de usos directos y del número de tecnologías que serán trabajadas, el tiempo estimado se basa en solo una de las aplicaciones consideradas. Adicionalmente, hay que tomar en cuenta que otras aplicaciones pueden analizarse y ejecutarse de manera paralela, en caso de requerirse.

Los actores principales de esta etapa serán el CEMIE-Geo y los proveedores de equipos, productos y servicios (Industria). Debido a que esta etapa puede requerir el establecimiento de lineamientos para la importación de tecnología y/o desarrollo de proveeduría nacional con capacidades de diseño y manufactura, se considera también necesaria la participación de la SENER.

La tercera acción, desarrollo de una cartera de paquetes tecnológicos y servicios de ingeniería, implica la operación continua de los procesos de asimilación y transferencia de tecnología, es decir, la comercialización de los paquetes tecnológicos y los servicios de ingeniería, puestos a punto en la acción 2. Los proveedores de equipos, productos y servicios (Industria) es el actor principal en esta acción como productor y usuario de los productos y servicios tecnológicos, en tanto que el CEMIE-Geo es actor relevante desde el punto de vista del productor. La SENER deberá participar como coordinador de los esfuerzos en el logro de los objetivos y metas perseguidos en las aplicaciones de los usos directos de la energía geotérmica.

Para el éxito del reto se requiere de actividades precedentes. En este caso, será necesario trabajar en la creación de un mercado de aplicaciones de los usos directos, es decir, en el desarrollo de estímulos gubernamentales, proyectos demostrativos con apoyo de gobierno, lineamientos y normatividad que promueva el uso de la energía geotérmica.

Este reto será apoyado con los resultados de las actividades del reto 1 (Formación de recursos humanos) y reto 3 (Inventario de recursos de calor geotérmico y de la industria).

c) *Localizar y evaluar recursos geotérmicos para los usos directos definidos como prioritarios*

Fecha de inicio: 2017 Fecha de terminación: 2019

Acciones prioritarias	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Hacer mapeo de recursos geotérmicos de baja entalpía susceptibles de ser aplicados en usos directos seleccionados.	24 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i SENER
Realizar el inventario de industrias con excedente de calor con potencial para ser aplicado en usos directo seleccionados.	24 meses	SENER Proveedores de equipos, productos y servicios (Industria) CEMIE-Geo, CoIDT+i
Realizar estudios de factibilidad técnico económica.	12 meses (Nota 1)	SENER Proveedores de equipos, productos y servicios (Industria)

Nota 1. El tiempo estimado de atención considera la realización de solo dos estudios; sin embargo, los estudios pueden realizarse en paralelo, o como se requiera.

El tercero de los retos identificados está vinculado con la ejecución de acciones enfocadas a construir un inventario de recursos de calor geotérmico disponibles para aplicaciones de los usos directos seleccionados (de baja entalpía), así como del calor disponible en otras industrias para su aprovechamiento. Su atención implica tres acciones consideradas como prioritarias.

Las acciones 1 y 2, el mapeo de recursos geotérmicos de baja entalpía y el inventario de las industrias con excedentes de calor, se centran en la realización de estudios, por lo que la capacidad tecnológica que será fortalecida es la generación de conocimientos e información de los recursos geotérmicos de baja entalpía y del calor residual en la industria. Estos estudios se podrán realizar en paralelo en un plazo de 24 meses, dependiendo del alcance de los mismos y de los recursos disponibles.

La acción 3, evaluación de la factibilidad técnico económica, es complementaria a la realización del inventario y proporcionará información a las acciones del reto 2 (capacidades de ingeniería y construcción) y en menor medida al reto 1 (formación de recursos humanos).

El tiempo estimado de atención del reto considera la realización de solo dos estudios; sin embargo, otros estudios pueden realizarse en paralelo según como sean requeridos. Las acciones prioritarias sugeridas para este reto deben iniciarse inmediatamente. Su consolidación se espera suceda entre dos y cuatro años, dependiendo del alcance y la concurrencia de recursos para su ejecución.

El actor principal de este reto es la SENER, quien actuaría como coordinador de las acciones, integrador y facilitador del conocimiento e información generado en la construcción de los inventarios. Actores importantes también serán el CEMIE-Geo y la Industria integrada en este caso por los proveedores de equipos, productos y servicios, quienes diseñarán y ejecutarán los estudios requeridos para construir los inventarios y para realizar los estudios de factibilidad técnico económica.

Como las acciones de este reto no generan valor económico de manera directa, se considera necesario contar con financiamiento para su ejecución. Por lo tanto, para resaltar los beneficios de este reto habrá que vincularlo con los retos 1 (formación de recursos humanos especializados) y 2 (desarrollo de capacidades tecnológicas) de usos directos, de tal manera que se hagan evidentes sus beneficios.

Acciones habilitadoras para fortalecer el desarrollo de la geotermia

En la industria de la geotermia, se identifican algunas barreras que deben superarse para acelerar su crecimiento. De manera general, las barreras pueden clasificarse en los siguientes cuatro tipos:

- **Regulatorias:** Se relacionan con los aspectos políticos, legales, permisos, así como consideraciones de impacto social y ambiental, que retrasan el desarrollo de un proyecto geotérmico.

- **Económicas:** Incluyen aspectos de mercado, financiamiento, inversiones, clientes y proveedores requeridos para facilitar los proyectos geotérmicos.

- **Recursos Humanos:** Consideran aspectos relacionados con la disponibilidad, suficiencia y especialización de expertos para soportar las actividades de la cadena de valor del proceso de aprovechamiento de la energía geotérmica.

- **Sociales:** En este grupo consideran aspectos como el impacto en las comunidades y población en general, durante el desarrollo de proyectos geotérmicos.

- **Ambientales:** Incluye los aspectos que tienen tienen algún impacto en el medioambiente local (p. ej., visual, acústica, uso de la tierra, ecosistemas naturales, áreas naturales protegidas, activos históricos y culturales, entre otros). Algunas veces estos impactos pueden constituir el mayor conflicto con otros intereses.

Un aspecto fundamental para facilitar la implementación de las acciones estratégicas que se han establecido para alcanzar la visión de la geotermia al 2030, tanto para la generación de electricidad como para los usos directos del calor geotérmico, es la definición de acciones habilitadoras orientadas a superar las barreras identificadas y fortalecer el desarrollo de la industria.

A continuación, se describen las barreras identificadas y las acciones habilitadoras sugeridas para su mitigación. Dichas acciones cubren las dos vertientes de la geotermia consideradas en el mapa (generación electricidad y usos directos de calor).

I. Ámbito económico

Una problemática específica y crítica durante el desarrollo de proyectos geotermoeléctricos son los altos costos de inversión inicial, más elevados que los asociados con otras fuentes renovables, lo que causa desánimo en inversionistas. Se estima que los costos de inversión por MWe instalado varían ampliamente entre 2.8 y 5.5 millones de dólares (USD) para una planta geotermoeléctrica típica de 50 MWe, dependiendo de factores tales como la geología de la zona geotérmica, la calidad del recurso (temperatura, flujo y composición del fluido) y la infraestructura disponible en el sitio de explotación.

En cuanto a la perforación de pozos, el riesgo financiero es alto, dado que los estudios de exploración superficiales no siempre permiten la caracterización y ubicación con certeza de las zonas idóneas para la explotación.

Un pozo productivo cuesta del orden de 3 a 10 millones de dólares, una caracterización equivocada de la ubicación y condiciones del reservorio geotérmico, puede conllevar pérdidas financieras importantes (Shevenell, 2012). Por lo tanto, este tipo de riesgo suele desalentar a los inversionistas y constituye un freno para el desarrollo de nuevos proyectos geotermoeléctricos.

Ante esta problemática, la SENER, Nacional Financiera (NAFIN), Clean Technology Fund (CTF) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) han creado un programa de financiamiento para proyectos cuyo objetivo principal es mitigar los riesgos asociados a la exploración, y en el cual la empresa MUNICH RE se encargará de desarrollar un mecanismo de seguro (Banco Interamericano de Desarrollo, 2014).

Por otra parte, para los usos directos del calor geotérmico, es necesario contar con estudios de mercado que permitan establecer estrategias para el desarrollo del mismo.

Así también, se denota un bajo aprovechamiento de los recursos geotérmicos, por desconocimiento del potencial que pueden tener para la industria.

Para enfrentar las barreras de tipo económico, se sugieren cuatro acciones habilitadoras, las cuales tienen la finalidad de promover y difundir los fondos e incentivos económicos que actualmente están disponibles a nivel gubernamental y privado.

De igual manera se considera importante que continúen los fondos públicos y privados (por ejemplo: Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, Incentivos verdes, entre otros) para desarrollar los proyectos geotérmicos. En este sentido es necesario el reforzamiento de estos fondos, sobre todo en la parte de exploración y perforación de pozos geotérmicos, donde se encuentra el mayor riesgo para los inversionistas.

Por otra parte, es necesario que se promueva entre los industriales nacionales e internacionales el potencial con que cuenta México, así como el nuevo marco legal que facilita el desarrollo de la industria geotérmica (generación de electricidad y usos directos).

Los principales actores para la ejecución de estas acciones habilitadoras, son la SENER y la Secretaría de Economía, en sus respectivos ámbitos de competencia. En general, las acciones habilitadoras sugeridas del ámbito económico son permanentes y requieren actualizarse continuamente a las condiciones y necesidades del mercado.

TABLA 8. ACCIONES HABILITADORAS DEL ÁMBITO ECONÓMICO PARA FORTALECER LA INDUSTRIA

Acciones habilitadoras	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Implementar incentivos económicos competitivos con relación a otras energías limpias.	12 meses	SENER Industria
Promover el uso de fondos públicos y privados para mitigar riesgos en la etapa de exploración.	Permanente	SENER Secretaría de Economía CONACYT
Realizar difusión a los industriales de las oportunidades de negocio en la explotación de los usos directos geotérmicos.	Permanente	SENER Industria
Promover convenios de colaboración internacional para desarrollar los recursos hidrotermales.	Permanente	SENER

II. Formación de recursos humanos

Debido a la riqueza de sus recursos naturales, México tiene una historia de desarrollo de especialistas en áreas de ciencias de la tierra, los cuales se enfocan en la explotación de petróleo y gas, minas y agua. Para la explotación de los recursos geotérmicos se requiere la participación de diversas especialidades en geociencias, por lo que se hace necesario incrementar el número de especialistas, tanto a nivel licenciatura como en posgrado, a fin de desarrollar capacidades para aprovechar el calor geotérmico.

TABLA 9. ACCIONES HABILITADORAS EN MATERIA DE RECURSOS HUMANOS PARA FORTALECER LA INDUSTRIA

Acciones	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Reforzar la formación especialistas de alto nivel para la explotación de recursos geotérmicos.	6-48 meses	CEMIE-Geo, CoIDT+i CONACYT

Para atender la falta de expertos en geotermia, con una visión moderna y actual, capaz de acelerar el desarrollo de la geotermia en el país, es necesario establecer una estrategia integral para desarrollar expertos en el corto plazo. Esta estrategia deberá establecerse a partir de un diagnóstico que considere las áreas de necesidad de conocimiento tecnológico, las instituciones de educación superior tanto públicas como privadas y centros de investigación, capaces de proporcionar el conocimiento requerido, así como la cantidad de recursos humanos que se requiere formar. La coordinación de la integración de la estrategia podría estar a cargo del CEMIE-Geo y la ejecución por parte de las instituciones de educación superior.

III. Ámbito regulatorio

En lo general, la LEG ha cubierto los aspectos legales importantes de los proyectos geotérmicos para el aprovechamiento de sus recursos. Sin embargo, existen algunos elementos que requieren una descripción más detallada, como es el desarrollo de proyectos concernientes a sistemas geotérmicos no convencionales (interpretado tangencialmente en la Ley al definir "otro tipo de yacimientos geotérmicos"), la posibilidad de explotar recursos geotérmicos para la instalación de ciclos binarios de acuerdo con la LAN, así como la disponibilidad de recursos geotérmicos para usos directos con temperaturas inferiores a los 80°C.

Una barrera importante es la alineación del marco normativo entre las diferentes entidades del gobierno federal para agilizar los trámites y facilitar el desarrollo de proyectos geotérmicos. La normatividad actual no facilita el desarrollo de los proyectos geotérmicos, porque falta alinear las necesidades industriales con el marco normativo, particularmente en lo que se refiere al aprovechamiento de recursos de baja entalpía.

En México se debe buscar impulsar la competitividad de la energía geotérmica en el mercado eléctrico mayorista frente a otras energías limpias, por lo que se están evaluando las posibles soluciones a esta nueva barrera que permita que la geotermia sea evaluada por sus características de carga base con la intención de volverla más atractiva a los inversionistas convencidos en desarrollar proyectos de este tipo. En este punto, un actor relevante es el CENACE.

Asimismo, se identifican barreras importantes relacionadas con la necesidad de adecuaciones legales para facilitar el desarrollo de proyectos de usos directos. Por otra parte, aun cuando existen tecnologías comerciales para el aprovechamiento de usos directos, en México, todavía no se ha desarrollado este mercado, por lo que se hace necesaria la implementación de estrategias que lo impulsen. A continuación se enlistan algunas acciones habilitadoras sugeridas para superar las barreras que han sido mencionadas y por consiguiente, fortalecer el desarrollo de la industria.

TABLA 10. ACCIONES HABILITADORAS DEL ÁMBITO REGULATORIO PARA FORTALECER LA INDUSTRIA

Acciones	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Desarrollar una propuesta de subasta específica para Geotermia	12 a 24 meses	SENER CRE CENACE
Actualizar y difundir las diferentes normatividades de entidades del gobierno federal, para agilizar los trámites y facilitar el desarrollo de proyectos geotérmicos.	12-24 meses	SENER
Adecuar el marco legal para facilitar el desarrollo de usos directos (recursos de baja entalpía).	12 meses	CONAGUA, SENER
Establecer mecanismos gubernamentales que impulsen el mercado de usos directos en el país.	24-72 meses	Gobierno estatal, gobierno municipal

Actualmente en las subastas de energía limpia la geotermia compite con tecnologías como solar y eólica, lo que provoca que proyectos geotermoeléctricos totalmente nuevos estén en desventaja para competir.

Por otra parte, es necesaria una revisión integral de los mecanismos y del proceso de gestión para la obtención de permisos y concesiones de proyectos geotérmicos, con la intención de agilizar y facilitar su desarrollo. SENER está trabajando sobre este aspecto e implementará en línea la ENREL.

En particular, para impulsar los usos directos en el país, se identificó que la principal barrera radica en la no existencia del mercado, por lo que la acción sugerida se orienta hacia la definición de estrategias gubernamentales que impulsen los usos directos tales como políticas de construcción de viviendas que consideren el uso de bombas de calor y normas para la conservación de alimentos, entre otras.

En función de sus ámbitos de competencia, la SENER y CONAGUA son las entidades que se identifican que deberán encabezar los esfuerzos para incentivar las adecuaciones legales y la definición de mecanismos para optimizar el desarrollo de un proyecto geotérmico en México. Se estima que estas acciones puedan implementarse en el corto y mediano plazo.

IV. Ámbito social

Una barrera importante para el desarrollo de proyectos geotérmicos, se encuentra en la falta de información y difusión sobre los beneficios de los proyectos geotérmicos en las comunidades. Existe una falsa percepción de los impactos negativos que un desarrollo geotérmico puede tener en las comunidades.

Es necesario desmitificar esta percepción con información verdadera y con rigor científico. Dado lo anterior, se hace necesario el establecimiento de estrategias de difusión e implementación de mecanismos de comunicación que involucren a las comunidades como parte del desarrollo de los proyectos geotermoeléctricos futuros, para ello es necesario llevar a cabo estudios de sustentabilidad integral como los realizados en países geotérmicos con liderazgo en estos temas (por ejemplo en Islandia; Shortall R., 2015)

La acción propuesta considera que es fundamental involucrar a las partes interesadas para identificar, plantear y discutir soluciones para todas las cuestiones ambientales y sociales que podrían afectar a las comunidades locales, así como la participación de las Universidades y Centros de Investigación que pueden ser portavoces de conocimientos técnicos precisos.

El principal promotor para esta acción es la SENER en conjunto con los concesionarios y desarrolladores. Esta acción es permanente y debe ejecutarse antes del inicio de todo proyecto geotérmico.

TABLA 11. ACCIONES HABILITADORAS DEL ÁMBITO SOCIAL PARA FORTALECER LA INDUSTRIA

Acciones	Periodo requerido para su atención	Participantes clave
Implementar mecanismos de involucramiento de las comunidades en proyectos geotérmicos.	Permanente	Representantes de las comunidades y terratenientes, SENER, concesionarios, Universidades y Centros de Investigación, instituciones financieras, bufetes de abogados, organizaciones no gubernamentales (ONG) y grupos comunitarios

Si bien, en este reporte no se presentan barreras medioambientales relevantes, sería muy importante considerar la realización de estudios sobre el "Análisis de Ciclo de Vida (Life Cycle Assesment)" de las diferentes tecnologías de energía geotérmica, tanto futuras como existentes, con base en las mejores prácticas internacionales que permitan evaluar la sustentabilidad ambiental de manera más integral e identificar las etapas o procesos que representan un área de oportunidad para mejorar el desempeño ambiental y energético a lo largo de su ciclo de vida (Santoyo-Castelazo & Azapagic, 2014; Santoyo-Castelazo, Gujba, & Azapagic, 2011; Tomasini-Montenegro, Santoyo-Castelazo, Gujba, Romero, & Santoyo, 2017).

FUENTE: SENER

Diagrama

El mapa de ruta es una herramienta gráfica que permite visualizar las acciones por realizar en un periodo de tiempo para alcanzar ciertas metas y objetivos establecidos.

Dado que existen dos vertientes para el uso de la energía geotérmica y que son independientes, se generaron dos diagramas de mapas de ruta, uno para generación de electricidad y otro para usos directos del calor geotérmico.

Ambos mapas están compuestos por una serie de capas que relacionan en tiempo diversos aspectos como son las metas, impulsores, recursos geotérmicos, acciones estratégicas y habilitadoras. El horizonte de tiempo de este mapa de ruta es al 2030, y los plazos se definen de la siguiente forma: corto de 2017 a 2020; mediano de 2020 a 2024 y largo del 2024 al 2030.

El esquema inicia con la visión al 2030, misma que se ubica en la parte superior, a continuación se presentan dos capas, en la primera se indican las metas establecidas en el tiempo, así como los principales impulsores del desarrollo de la industria. Para el caso de generación de electricidad, a continuación, se encuentra la capa que corresponde a los recursos geotérmicos, en donde se identifican aquellos que se consideran de mayor contribución a las metas establecidas y los plazos en los que es factible su explotación.

La siguiente capa pertenece a las acciones consideradas estratégicas para el desarrollo de la industria, las cuales se ubican en los periodos de tiempo estimados para que su ejecución genere las capacidades tecnológicas que permitan obtener un mejor aprovechamiento de los recursos geotérmicos.

Finalmente, en la capa inferior se encuentran las acciones habilitadoras que se deben realizar para mitigar las barreras de tipo económico, social, de regulación y de recursos humanos.

Mapa de ruta para la generación de electricidad

En lo que respecta al diagrama correspondiente a generación de electricidad, se observa que para lograr el incremento en la capacidad instalada que se considera tener en 2030, se deberán explotar los recursos de mediana y alta entalpía, así como los recursos no convencionales (sistemas súper calientes y de roca seca caliente). Sin embargo, estos últimos sólo contribuirán de manera marginal a la generación de energía eléctrica debido al escaso nivel de desarrollo que presentan actualmente. Los retos que deberán de atenderse se orientan en general, hacia la reducción de los costos de operación de las plantas existentes, y a la disminución de los costos de inversión de nuevas instalaciones, a través de la reducción de la incertidumbre en la exploración y los costos de perforación de yacimientos geotérmicos hidrotermales.

El mapa de ruta indica las acciones prioritarias tanto estratégicas, como habilitadoras que deben ejecutarse para fortalecer la generación de electricidad a partir de Geotermia. De esta forma al 2030, se habrán realizado varios proyectos de generación eléctrica con recursos de mediana y alta entalpía agregando 750 MW de capacidad instalada, las plantas existentes habrán incrementado su eficiencia y se contará con capacidades tecnológicas e información para la explotación de los recursos no convencionales en el país.

Mapa de ruta para usos directos de calor

El esquema correspondiente a los usos directos de calor contiene acciones generales para su desarrollo que corresponden a la generación de las capacidades tecnológicas básicas necesarias para soportar el desarrollo de esta industria en las siguientes aplicaciones: calefacción/enfriamiento por bombas de calor, deshidratación de alimentos y usos industriales. De esta forma, se deberá trabajar en la formación de especialistas en diseño, instalación y mantenimiento de instalaciones comerciales e industriales, así como en la ubicación y evaluación de los recursos para ser explotados. Dichas acciones pueden iniciarse aun cuando no esté completamente desarrollado el mercado.

En el caso de los usos directos de calor existe una barrera que corresponde propiamente al desarrollo del mercado de productos y servicios que aprovechen el calor geotérmico tanto para usos residenciales como industriales. En consecuencia, las acciones habilitadoras se enfocan en establecer mecanismos que incentiven este mercado.

En ambos casos, los retos y las acciones habilitadoras que se presentan, corresponden a situaciones que deben atenderse en el corto plazo. En la medida que se fomente el mercado de usos directos del calor geotérmicos, irán apareciendo condiciones que permitan comprender con más detalle los retos y barreras adicionales que deberán ser superados para impulsar su desarrollo sustentable.

En términos generales, la lectura del diagrama debe realizarse en cada capa de la esquina inferior izquierda a la esquina superior derecha. De esta manera, las acciones que requieren de un menor plazo para atender las barreras y retos se sitúan en la parte inferior y aquellas que implican un mayor plazo se localizan en la parte superior.

Anexo a este reporte se incluyen los diagramas correspondientes a los mapas de ruta tecnológica para generación de electricidad y usos directos del calor.

FUENTE: SENER

Conclusiones y acciones siguientes

Conclusiones

Existe la necesidad y la voluntad de desarrollar de manera sostenible la industria geotérmica en México, y el país tiene el potencial para lograrlo. El Mapa de Ruta Tecnológica es una guía para alcanzar este propósito, identificándose en él los principales retos y barreras para el desarrollo de los dos tipos de aplicaciones de la geotermia: la generación de electricidad y los usos directos de calor.

En el caso de generación de electricidad, se considera viable que para el año 2030, puedan agregarse 750 Megawatts a la capacidad instalada actual, a partir de la explotación de recursos geotérmicos de alta y mediana entalpía. Sin embargo, a largo plazo también hay un elevado potencial de aprovechar recursos geotérmicos de baja entalpía y recursos no convencionales, particularmente los súper calientes y de roca seca caliente entre estos últimos.

De acuerdo a lo anterior, en el mapa de ruta se consideran acciones estratégicas relacionadas con los siguientes recursos: (1) Alta y mediana entalpía, (2) Baja entalpía y (3) No convencionales (súper calientes y roca seca caliente).

Los retos de atención prioritaria para el logro de la visión al 2030 toman en cuenta la madurez de la tecnología y los recursos geotérmicos susceptibles de aprovecharse. Así, los retos para los recursos geotérmicos convencionales se enfocan en desarrollar capacidades tecnológicas para reducir los costos de operación de las instalaciones existentes y para disminuir la inversión inicial en plantas futuras. Para ello resultan fundamentales las acciones tendientes a minimizar la incertidumbre durante la exploración y a abatir los costos de perforación.

Con referencia a los recursos no convencionales (roca seca caliente y sistemas súper calientes), las acciones estratégicas se orientan a generar capacidades tecnológicas que permitan entender su comportamiento y eventual desarrollo, así como a adquirir la capacidad de explotarlos en forma comercial a largo plazo, siempre que su aprovechamiento resulte seguro además de técnica y económicamente factible.

En el caso de usos directos de la geotermia, el objetivo primordial es establecer las bases para desarrollar el mercado de las siguientes tres aplicaciones: calefacción/enfriamiento con bombas de calor, deshidratación de alimentos y aprovechamiento del calor en usos industriales. Estos son los usos considerados con la mayor viabilidad de explotación comercial y demanda potencial en el mercado nacional. Los retos identificados para apoyar el desarrollo de esta industria se enfocan en generar capacidades tecnológicas para el diseño y construcción de equipos e instalaciones comerciales de usos directos, así como en la localización y evaluación de los recursos geotérmicos aprovechables para usos directos.

Por otra parte, se identificaron una serie de barreras que limitan el desarrollo de la industria y que pueden agruparse en las siguientes categorías: regulatorias, económicas, sociales y de recursos humanos. Entre las barreras consideradas más importantes se encuentran las de tipo económico y regulatorio, destaca el aspecto de la competitividad de la energía geotérmica en las subastas de energía frente a otras energías limpias. Otra barrera importante tiene que ver con los altos costos de inversión inicial en proyectos geotérmicos, que son más elevados que los de otras fuentes renovables. Al respecto ya se están implementando mecanismos con incentivos económicos y financieros para impulsar la inversión en proyectos geotérmicos, aunque aún debe adaptarse y actualizarse.

Entre las acciones habilitadoras consideradas relevantes en el ámbito regulatorio, es necesaria una revisión integral de los mecanismos y procedimientos de gestión para obtener los permisos necesarios para desarrollar proyectos geotérmicos, tanto de usos directos, como de energía eléctrica. Si bien, en este reporte no se presentan barreras medioambientales relevantes, sería muy importante considerar la realización de estudios sobre el "Análisis de Ciclo de Vida (Life Cycle Assesment)" de las diferentes tecnologías de energía geotérmica, tanto futuras como existentes, con base en las mejores prácticas internacionales que permitan evaluar la sustentabilidad ambiental de manera más integral e identificar las etapas o procesos que representan un área de oportunidad para mejorar el desempeño ambiental y energético a lo largo de su ciclo de vida.

Asimismo, es importante incorporar la parte social como un actor fundamental en la programación de los proyectos geotérmoeléctricos futuros, para ello se requieren llevar a cabo estudios de

sustentabilidad integral como los realizados en países geotérmicos con liderazgo como por ejemplo en Islandia.

Por otra parte, se identifican tres grupos de actores relevantes para la implementación de las acciones establecidas en el mapa de ruta: el Gobierno, la Industria y la Comunidad de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación.

El Gobierno está integrado por los órganos reguladores del sector, siendo la SENER, la CRE y la CONAGUA los actores clave. Entre los principales roles del Gobierno se encuentran el establecimiento de políticas para el desarrollo de la industria y mejorar su regulación, para apoyar la investigación y el desarrollo tecnológico, y para promover el financiamiento en las etapas iniciales de los proyectos, que son las de mayor riesgo para el inversionista.

Por su parte, la Comunidad de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación incluye a todas las Instituciones de Educación Superior y Centros de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación, tanto públicos como privados, relacionados con la geotermia en México.

Esta comunidad deberá llevar a cabo los proyectos de investigación, desarrollo tecnológico e innovación, enfocados a resolver problemas prácticos y reales de la industria y a desarrollar las capacidades tecnológicas requeridas para una mejor explotación de los recursos geotérmicos actuales y futuros. En este sentido, el rol del CEMIE-Geo cobra especial relevancia para coordinar la ejecución de proyectos (investigación aplicada, desarrollo tecnológico e innovación) y acciones estratégicas a nivel nacional, asegurando que sus resultados sean de valor para que el sector sea cada vez más competitivo. El MRT considera que la vinculación academia-industria es fundamental.

El grupo de la Industria se conforma por los desarrolladores, concesionarios e inversionistas, cuya colaboración en la identificación, desarrollo e implementación de los resultados de los proyectos de investigación y desarrollo tecnológico es indispensable para mejorar su desempeño.

Si bien, las acciones sugeridas señalan la participación de estos grupos, estas solo deben considerarse de manera indicativa para orientar la definición de políticas públicas, programas e iniciativas enfocadas a fortalecer, incrementar y/o generar las capacidades tecnológicas necesarias para dar soporte al desarrollo sustentable de la industria en el mediano y largo plazo, incluyendo infraestructura, recursos humanos especializados, y servicios tecnológicos, entre otros.

Acciones siguientes

Los resultados que se presentan en este mapa de ruta tecnológica, responden a las condiciones prevalecientes del contexto en el 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 la industria geotérmica en el país, se tendrá nueva información para actualizar la visión y premisas que se presentan en este mapa de ruta, por lo que este documento deberá ser actualizado de manera periódica.

En lo que respecta a los usos directos del calor geotérmico, es importante que se revisen los avances para definir acciones futuras que atiendan un mercado desarrollado de los usos directos. Asimismo, es importante realizar un ejercicio específico para este tema.

El Mapa de Ruta Tecnológica es un plan que requiere de la definición de acciones concretas para difundirse e implementarse. Para ello, es necesario formar un Grupo de Implementación del mapa conformado por representantes de los tres grupos de actores clave: Gobierno, Industria y Comunidad de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación.

Se requiere establecer un plan de implementación que considere ciclos de revisión y evaluación de resultados en forma anual. Estos ciclos deben considerar la evaluación de los resultados de los proyectos de investigación y desarrollo tecnológico, así como la evaluación del despliegue de las mejoras tecnológicas en la industria (aplicación de los resultados de los proyectos en la industria). Para estos ciclos de evaluación es necesario desarrollar indicadores y criterios tanto para los proyectos de investigación, desarrollo tecnológico e innovación, como para el despliegue de las mejoras tecnológicas en la industria.

Adicionalmente, como parte del ciclo de evaluación anual se debe de dar seguimiento al avance de las acciones habilitadoras enfocadas a

eliminar o disminuir el impacto de las barreras consideradas (o que están siendo atendidas). En lo que respecta a los usos directos del calor geotérmico, es importante que se revisen los avances para definir acciones futuras que atiendan un mercado desarrollado de los usos directos.

Finalmente, se recomienda que el MRT se actualice cada tres años, y que se implemente una estrategia de difusión para dar a conocer los resultados de esta iniciativa entre todas las instituciones involucradas en la realización de las acciones estratégicas y habilitadoras para lograr la visión establecida al año 2030.

FUENTE: SENER

Referencias bibliográficas

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.

Banco Interamericano de Desarrollo. (01 de Agosto de 2014). *México desarrollará un programa de mitigación de riesgos para proyectos privados de energía geotérmica con apoyo del BID*. Recuperado el 01 de Agosto de 2016, de http://www.iadb.org/es/noticias/comunicados-de-prensa/2014-06-02/mexico-desarrollara-energia-geotermica-con-apoyo-bid,10830.html

Bertani, R. (2015). Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report. *Proceedings World Geothermal Congress*, (pág. 19). Melbourne, Australia.

Comisión Federal de Electricidad. (26 de Julio de 2015a). *CFE Boletines de prensa*. Recuperado el 13 de 06 de 2016, de Avanza generación de energía geotérmica de la CFE: http://saladeprensa.cfe.gob.mx/boletines/show/8251/

Comisión Federal de Electricidad. (09 de Diciembre de 2015b). *CFE Boletines de prensa*. Recuperado el 10 de 06 de 2016, de La CFE anuncia el resultado de la licitación del proyecto para el desarrollo de una central geotérmica en Michoacán: http://saladeprensa.cfe.gob.mx/boletines/show/8313/

DOF. (11 de 08 de 2014a). Ley de la Industria Eléctrica. México.

DOF. (11 de 08 de 2014b). Ley de Energía Geotérmica. México.

DOF. (24 de 12 de 2015). Ley de Transición Energética. México.

DOF. (24 de 03 de 2016). Ley de Aguas Nacionales. México.

El Economista. (22 de 05 de 2015). *Grupo Dragón inaugura explotación privada de geotermia*. Recuperado el 03 de 03 de 2016, de http://eleconomista.com.mx/industrias/2015/05/22/grupo-dragon-inaugura-explotacion-privada-geotermia

ESMAP. (2012). *Manual de Geotermia: Cómo planificar y financiar la generación de electricidad*. Washington: ESMAP.

Grupo Dragón. (2016). *Nuestra Infraestructura*. Recuperado el 05 de 12 de 2016, de http://www.gdragon.com.mx/Infraestructura.aspx

Gutiérrez Negrín, L. (01 de 05 de 2014). Aspectos relevantes de la iniciativa de Ley de Energía. *Asociación Geotérmica Mexicana*. Recuperado el 01 de 01 de 2016, de Aspectos relevantes de la iniciativa de Ley de Energía: http://geotermia.org.mx/geotermia/pdf/ASPECTOS.pdf

Gutiérrez-Negrín, L., Maya-González, R., & Quijano-León, J. L. (2015). Present situation and perspectives of geothermal in Mexico. 1-10.

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.

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

Lukawski, M., Anderson, B., Augustine, C., Capuano, L., Beckers, K., Livesay, B., & Tester, J. (2014). Cost analysis of oil, gas, and geothermal well drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering, 118*, 1-14.

Lund, J., & Boyd, T. (2015). Direct Utilization of Geothermal Energy 2015. *Worldwide Review. Proccedings World Geothermal Congress 2015*, 31.

Naciones Unidas. (2015). *Convención Marco sobre el cambio climático. Conferencia de las Partes.* París.

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

Santoyo, E., Guevara, M., & Pérez-Zarate, D. (2015). *Estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios en el tema de energía geotérmica.* Recuperado el 01 de 01 de 2016, de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LEG_110814.pdf

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.

SENER. (2015a). *Prospectivas de Energías Renovables 2015-2029*. Recuperado el 04 de 01 de 2016, 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. (2015b). *Prospectiva del Sector Eléctrico 2015-2029*. Recuperado el 01 de 01 de 2016, de http://www.gob.mx: http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva_del_Sector_Electrico.pdf

SENER. (2016a). *INERE. Inventario Nacional de Energías Renovables.* Recuperado el 2 de 12 de 2016, de https://dgel.energia.gob.mx/inere/

SENER. (2016b). *Reporte de Avance de Energías Limpias.* México.

SENER. (2016c). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2016-2030*. México.

SENER-IMP. (2016a). *Reporte de Inteligencia Tecnológica en Geotermia.* Ciudad de México: IMP.

SENER-IMP. (2016b). *Diagnóstico Tecnológico del CEMIE-Geo.* Ciudad de México.

SENER-IMP. (2017). *Cartera de Necesidades de Innovación y Desarrollo Tecnológico - Geotermia.* Ciudad de México.

Shevenell, L. (2012). The Estimated Costs as a Function of Depth of Geothermal development Wells Drilled in Nevada. *Geothermal Resource Council Transactions, 36*, 121-128.

Shortall R., D. B. (2015). Geothermal energy for sustainable development: Areview of sustainability impacts an assessment frameworks. . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 391-406.

Stephens, J. C., & Jiusto, S. (2010). Assessing innovation in emerging energy technologies: Socio-technical dynamics of carbon capture and storage (CCS) and enhanced geothermal systems (EGS) in the USA. *Energy Policy, 38*(4), 2020-2031. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.12.003.

Tomasini-Montenegro, C., Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H., Romero, R. J., & Santoyo, E. (2017). Life cycle assessment of geothermal power generation technologies: An updated review. *Applied Thermal Engineering*, 1119-1136.

2017

SENER

SECRETARÍA DE ENERGÍA

ESTADOS UNIDOS MEXICANOS