



CENTRO DE ESTUDIOS INTERNACIONALES

**El desarrollo de la geotermia como fuente de energía en
México**

T E S I S

Que para obtener el título de:
Licenciada en Relaciones Internacionales

Presenta:
Laila García Ferrer

Directora:
Dra. Isabelle Rousseau

Ciudad de México, 2025.

Agradecimientos

Me siento profundamente agradecida con todas las personas que me guiaron hacia y durante mi licenciatura en El Colegio de México, sin su apoyo escribir esta tesis hubiera sido inalcanzable.

Gracias a mis papás, Clementina y Othón, por siempre impulsar mi educación y mostrarme formas distintas de pensar, conocer y vivir las cosas. Gracias a mi hermano, Tiago, por trazar el rumbo hacia la academia. Gracias a mis maestras y maestros de la escuela Maxei por fomentar mi curiosidad y enseñarme a aprender pensando. En especial, gracias a Gaby, Leonor y Mireille por hablarme de ecología. En varios sentidos, esta tesis se comenzó a gestar en el Eco-Club Maxei. También le agradezco a Valentina por encaminarme hacia El Colegio.

Aunque empezar la licenciatura en medio de la pandemia se vislumbraba como un proceso solitario varios me apoyaron, escucharon y alentaron hasta la llegada de los días colmeas presenciales. Gracias a Gabriel y Fernanda por compartirme su cariño y familia. Gracias a Rodrigo por su amistad e inquietud intelectual. Gracias a Miguel Zerón por su orientación y paciencia.

A mis amigas, Emilia y Mariana, les agradezco infinitamente por todo su amor y compañía. Crecí con ustedes. Gracias a Tomás, Isaac, Inés y Santiago por su complicidad y a Nicolás por escucharme y alentarme. Gracias a mis compañeras y compañeros de RRII y PAP, son una inspiración constante de resiliencia y aprendizaje.

Gracias a mis profesoras y profesores por las clases, discusiones y espacios de pensamiento crítico. En particular, gracias a Beatriz Zepeda por su rigor y por introducirme a los estudios ambientales y climáticos, y a Fernando Escalante por su tutelaje y apoyo constante.

Asimismo, le agradezco a Rodrigo Peña y Ana Covarrubias por acompañar el inicio de mi proceso de tesis y a Antonio Azuela por ampliar mis reflexiones y apreciaciones ambientales en paralelo a mi investigación.

Agradezco enormemente a mi asesora de tesis, Isabelle Rousseau, por su dirección, exigencia, paciencia y compromiso con mi investigación y la geotermia. Gracias a mis lectores, María Cecilia Zuleta y Gerardo Hiriart, por su tiempo y valiosos comentarios. De igual manera, gracias a Hiriart por su orientación desde el inicio de la investigación y por el contacto con varias personas entrevistadas. Sobre esta línea, agradezco a los entrevistados por su tiempo y confianza. Sus contribuciones fueron indispensables para la tesis.

Asimismo, le agradezco particularmente al Ingeniero José Luis Hernández Galán por su tiempo, calidez y aportaciones bibliográficas para realizar la investigación. Su trabajo fue indispensable para los componentes históricos de la tesis.

Gracias a Chabe y Ana por su apoyo logístico; a Erika Leyva por su amabilidad y ayuda organizacional en el proceso de defensa de tesis y a Cécilia Baeza por sus ánimos y apoyo en mi siguiente etapa de estudios energéticos.

Por último, le agradezco especialmente a Bernardo por leerme, creer en mí y acompañarme incondicionalmente.

Índice

Índice de figuras y tablas.....	6
Figuras.....	6
Tablas.....	7
Introducción general.....	8
Capítulo I.....	12
La geotermia como fuente de energía: fundamentos técnicos, potencial, ventajas y desventajas.....	12
Introducción.....	12
I. Marco teórico parte I: fundamentos técnicos y tecnológicos.....	13
A. ¿Qué es la geotermia?.....	13
B. ¿Cómo se puede usar la geotermia?.....	16
i. Usos directos.....	18
ii. Uso indirecto: generación de electricidad.....	19
iii. Plantas geotermoeléctricas mexicanas.....	23
iv. ¿Cuáles son las etapas de desarrollo de proyectos geotermoeléctricos?.....	24
v. Usos mixtos o aprovechamiento cascada.....	25
vi. Extracción de productos minerales derivados.....	26
C. ¿Dónde se puede aprovechar?.....	26
D. Potencial de la geotermia en México.....	28
E. Desventajas de la energía geotérmica.....	31
F. Ventajas de la geotermia.....	37
Conclusión.....	43
Capítulo II.....	45
Justificaciones y barreras: el potencial de la geotermia en la política energética mexicana y las barreras sistémicas de la teoría del carbon lock-in.....	45
Introducción.....	45
I. Marco teórico parte II: principios energéticos a los que puede aportar la geotermia y el <i>carbon lock-in</i>	47
A. Grandes principios de política energética.....	47
i. Panorama energético global.....	47
ii. Seguridad energética.....	48
iii. Soberanía energética.....	50
iv. Transición energética.....	52
v. Geotermia y seguridad energética.....	54
vi. Geotermia y soberanía energética.....	55
vii. Geotermia y transición energética.....	56
B. Sendero de la dependencia y <i>carbon lock-in</i>	59
i. La importancia de los hidrocarburos en el sector energético mexicano.....	59
ii. Institucionalismo histórico y el sendero de la dependencia.....	64
iii. <i>Carbon lock-in</i>	67
1. <i>Lock-in</i> tecnológico.....	71
2. <i>Lock-in</i> institucional.....	73
3. <i>Lock-in</i> conductual.....	75
4. Consecuencias del <i>carbon lock-in</i> , también fuentes del <i>carbon lock-in</i>	76

5. <i>Lock-in</i> de energías renovables.....	79
6. <i>Lock in</i> positivo.....	81
7. Escapar del <i>carbon lock-in</i>	82
8. Alcance del <i>carbon lock-in</i>	86
II. Marco metodológico.....	87
A. Metodología.....	87
B. Logros y limitaciones.....	89
Conclusión.....	91
Capítulo III.....	93
Inicio del desarrollo contemporáneo geotérmico en México: mediados del siglo XX a	
inicios del siglo XXI.....	93
Introducción.....	93
I. La fundación de la CFE y sus objetivos.....	94
II. Inicios de la energía geotérmica en México.....	95
III. Pathé, Hidalgo: la primera planta comercial de energía geotérmica en América.....	97
IV. El despegue de la geotermia mexicana y sus años de auge.....	98
V. El parteaguas de 1973.....	101
VI. La geotermia mexicana del siglo XX en contexto.....	102
VII. Pemex y la geotermia.....	105
VIII. Cerrito Colorado: una piedra en el zapato de la geotermia.....	109
IX. 1990: El cambio climático entra a las preocupaciones ambientales de la época.....	112
X. La geotermia en la primera década del siglo XXI.....	114
XI. Los <i>lock-ins</i> de la geotermia.....	117
Conclusión.....	119
Capítulo IV.....	121
La ola de la Ley de Energía Geotérmica: intentos de fomento en el siglo XXI.....	121
Introducción.....	121
I. La Reforma Energética de 2013 y la reforma al sector eléctrico.....	122
II. Domo de San Pedro: desarrollo geotérmico sin necesidad de la LEG.....	127
III. Ley de Energía Geotérmica (LEG): instrumento legislativo de fomento.....	129
IV. Incentivos de fomento financieros.....	133
V. Incentivos de fomento de investigación.....	133
VI. Incentivos de fomento fiscales.....	135
VII. Análisis de implementación.....	136
VIII. Los <i>lock-ins</i> de la geotermia en esta etapa.....	138
Conclusiones.....	138
Capítulo V.....	140
El futuro de la geotermia.....	140
Introducción.....	140
I. Avances tecnológicos de la geotermia.....	142
A. Avances geotermoeléctricos.....	142
B. Avances en usos directos.....	146
C. Avances entra la industria de gas y petróleo y la geotermia.....	149
D. Avances en extracción de minerales críticos.....	151

II. Oportunidades para México a partir de innovaciones internacionales.....	152
A. Condiciones facilitadoras para el desarrollo geotérmico.....	153
III. Futuro planeado de la geotermia en México.....	154
A. Estrategia Nacional del Sector Eléctrico y la geotermia.....	155
B. Ley de Geotermia.....	157
i. Modos de aprovechamiento según la LG.....	159
ii. ¿Por qué una nueva ley?.....	162
C. Oportunidades de la geotermia a futuro.....	163
Conclusiones.....	167
Conclusión.....	168
I. Hallazgos.....	168
A. El Estado al mando de la geotermia, oportunidades pendientes para el sector privado.....	168
B. Distintas razones de justificación de desarrollo, distintos niveles de fomento.....	170
C. El <i>carbon lock-in</i> y la geotermia.....	171
D. Oportunidades para desbloquear el potencial: innovaciones tecnológicas y precedentes históricos.....	172
II. Límites y posibles vías de investigación.....	173
Bibliografía.....	177
Lista de entrevistas.....	196
Entrevistas realizadas.....	196
Ejemplos de preguntas de entrevistas.....	197
Abreviaciones.....	198

Índice de figuras y tablas

Figuras

Figura 1. Matriz eléctrica nacional (%), 2024.

Figura 2. Estructura interna de la Tierra con capas, profundidades y temperaturas promedio.

Figura 3. Diagrama de Lindal.

Figura 4. Mapa de centrales geotermoeléctricas mexicanas.

Figura 5. Los tres neoinstitucionalismos

Figura 6. Comparación entre sistemas de geotermia hidrotermal, EGS y AGS.

Figura 7. Mapa de intersección entre centros urbanos y potencial para calefacción y enfriamiento con geotermia.

Tablas

Tabla 1. *Tipos de plantas geotermoeléctricas convencionales.*

Tabla 2. *Estimaciones de potencial geotermoeléctrico en México comparadas con la demanda eléctrica nacional.*

Tabla 3. *Cualidades técnicas positivas de la geotermia como fuente de energía.*

Tabla 4. *Cualidades técnicas positivas de la geotermia como fuente de energía y su aporte a objetivos de política energética.*

Tabla 5. *Renta petrolera como proporción del PIB, 1972-1983.*

Tabla 6. *Fuentes de generación eléctrica en México, 2024.*

Tabla 7. *Capacidad geotérmica neta instalada 2010.*

Tabla 8. *Capacidad neta instalada por tipo de generación (Septiembre 2010).*

Tabla 9. *Capacidad geotérmica en México, con proyectos en construcción y nuevos proyectos (2010).*

Tabla 10. *Proyectos de exploración geotérmica (hasta 2010).*

Tabla 11. *Lock-ins presentes en la historia del desarrollo geotérmico.*

Tabla 12. *Comparación del artículo 1 de LEG y LG.*

Tabla 13. *Posibles vínculos entre la misión del Plan México y el desarrollo de la geotermia.*

Introducción general

“Al estudiar Relaciones Internacionales pensaba en el cambio climático y sus soluciones desde un nivel muy macro, desde muy arriba. Me interesó el caso de la geotermia para entender qué pasa a una escala más local y entender las soluciones desde abajo...

‘¡Pues te fuiste muy abajo!’”

– Conversación con Ing. José Luis Hernández Galán, pionero del desarrollo geotérmico nacional.

La geotermia es una fuente de energía que sólo se puede explotar con facilidad en pocas partes del mundo. En esencia, está disponible cerca de los límites tectónicos del planeta por las condiciones geológicas de esas localidades. Por azar, el territorio mexicano se encuentra sobre varios límites de placas tectónicas, lo que convierte a México en uno de los pocos lugares en el mundo donde la geotermia se puede aprovechar de forma relativamente sencilla.¹

Además, la geotermia es particularmente interesante mientras más se le observa. Tiene varios usos; el más popular es la generación de electricidad, mejor conocida como energía geotérmica. Sin embargo, también hay aplicaciones directas y versátiles del calor geotérmico para procesos productivos o usos recreacionales o terapéuticos. Para su uso eléctrico, es una fuente de energía constante; es decir, no es intermitente, lo que la hace un tipo de energía confiable, resiliente e independiente de factores externos como el clima, precios de materias primas o cadenas de suministro –por ejemplo, cadenas de suministro de combustibles o minerales raros–. Aunado a esto, es una energía baja en carbono, renovable y, en términos generales, con un impacto bajo en el medio ambiente. Sus aplicaciones directas también son

¹ Para el debate de ciencias sociales acerca de si la “geografía es destino”, las posibilidades de aprovechamiento de la geotermia apuntan la discusión hacia el sí.

ambientalmente amigables y son alternativas tecnológicas limpias. Por lo tanto, la geotermia es una energía atractiva frente a la necesidad creciente de fundamentar los sistemas energéticos en tecnologías bajas en carbono para mitigar el cambio climático y reducir el deterioro de los ecosistemas globales. Por otro lado, se trata de una fuente de energía prácticamente inagotable. Como el calor emana de ciclos naturales de decadencia de los elementos del núcleo de la Tierra, es un proceso interminable para efectos humanos.

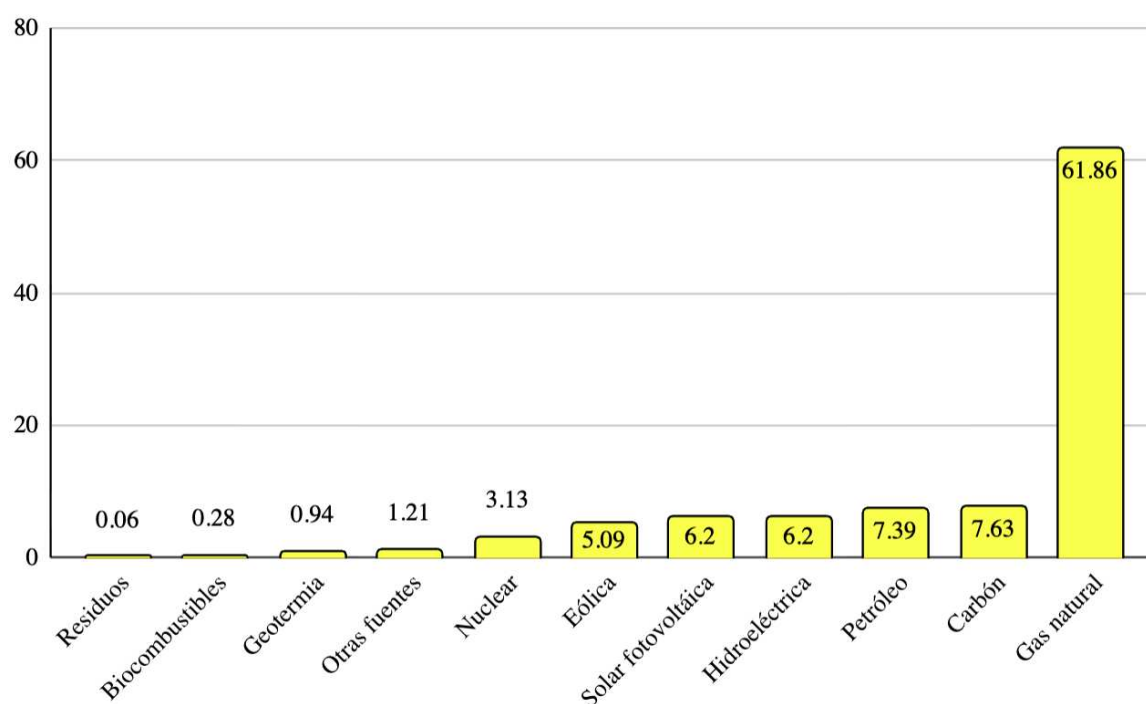
De modo paralelo, México tiene un potencial geotérmico muy alto –dependiendo de la tecnología simulada, producir energía geotermoeléctrica a escala tiene el potencial de cubrir entre 22% y 108% de la demanda eléctrica nacional presente²–; sin embargo, hoy en día representa menos del 2% de la matriz energética mexicana.³ Como se aprecia en la figura siguiente, en concreto, en el 2024 representó el 0.94% de la generación eléctrica nacional. Evidentemente, esto indica una brecha entre el potencial y el desarrollo geotérmico del país. Sin embargo, simultáneamente, México tiene una larga trayectoria en el desarrollo de la geotermia. La primera planta se inauguró el 20 de noviembre de 1959 en Hidalgo. Por lo tanto, a primera vista es difícil de creer que la brecha se debe a falta de experiencia o a falta de potencial.

En otras palabras, a primera impresión, la geotermia es una energía con cualidades positivas e interesantes, con mucho potencial a nivel nacional y una trayectoria antigua, pero por alguna razón representa una proporción muy pequeña de la matriz energética nacional. Frente a este panorama, esta investigación pretende responder la pregunta: ¿Cuáles son las causas entre la asimetría del potencial y el poco desarrollo de la geotermia en México?

² Véase *Tabla 2. Estimaciones de potencial geotermoeléctrico en México comparadas con la demanda eléctrica nacional*, pág. 25.

³ Secretaría de Energía (SENER), *Balance Nacional de Energía 2023* (Ciudad de México: Secretaría de Energía, 2024), PDF, 48.

Figura 1: Matriz eléctrica nacional (%), 2024.⁴



Para responder la pregunta, la investigación se estructura en cinco capítulos. Los primeros dos conforman el marco analítico de la tesis. A su vez, se compone de dos grandes apartados, uno técnico y otro teórico. En particular, el primer capítulo cubre el apartado técnico al exponer las características tecnológicas y fundamentos técnicos de la geotermia como fuente de energía. Su objetivo es identificar las posibilidades y límites inherentes de su naturaleza técnica y también presentar sus ventajas y desventajas. De igual manera, el capítulo expone el potencial geotérmico nacional. Con él, comienza a ser evidente la brecha entre potencial y desarrollo.

El segundo capítulo completa el marco analítico de la tesis con la exposición teórica del neoinstitucionalismo aplicado al desarrollo energético moderno y contemporáneo y, además, expone el marco metodológico. Con el propósito de

⁴ Elaboración propia con datos de la IEA. International Energy Agency (IEA), “Mexico — Energy mix,” IEA, consultado el 3 de octubre de 2025, <https://www.iea.org/countries/Mexico/energy-mix>

entender con qué argumentos los actores políticos pueden justificar el desarrollo de energía geotérmica, el capítulo comienza con un análisis de cómo las características técnicas de la geotermia pueden ser aprovechadas para lograr objetivos de política energética. De igual manera, el segundo capítulo discute la importancia de los hidrocarburos en el sector energético y eléctrico nacional para señalar un tipo de sendero de la dependencia presente en el sector energético: el *carbon lock-in*. En seguida, se profundiza en el *carbon lock-in* para, en el resto de los capítulos, analizar cómo afecta al desarrollo de la geotermia en México. Asimismo, al final del segundo capítulo se presenta el marco metodológico de la tesis. Se discute cuál fue el diseño de investigación, los métodos y técnicas que se priorizaron y cuáles son sus alcances y límites.

Los siguientes tres capítulos exponen cronológicamente las etapas del desarrollo geotérmico nacional y son complementados con evidencia documental y testimonial de figuras relevantes en el desarrollo de la industria. El tercer capítulo recuenta los inicios del desarrollo de la geotermia en México, cómo llegó a su auge y, después, a cierto estancamiento. Luego, los capítulos cuatro y cinco analizan dos periodos más cortos que cubren aproximadamente los últimos veinte años del desarrollo geotérmico nacional. El cuarto capítulo analiza los cambios que trajo la Ley de Energía Geotérmica, expedida en 2014 junto a la Reforma Energética de 2013, y el quinto analiza el futuro de la geotermia y las nuevas disposiciones para su desarrollo decretadas en la nueva Ley de Geotermia, emitida en marzo de 2025 como parte del paquete de legislación secundaria de la Reforma Energética de 2024. Los tres capítulos históricos incorporan los elementos teóricos expuestos en los primeros dos capítulos. Finalmente, la conclusión discute los hallazgos principales de la tesis y señala incógnitas que podrían ser vías de investigación a futuro.

Capítulo I

La geotermia como fuente de energía: fundamentos técnicos, potencial, ventajas y desventajas

“México es un país que tiene este potencial [en] todo el cinturón volcánico mexicano, hay muchas zonas de manifestaciones que están estudiadas...”
-Entrevista C, 18 de septiembre de 2024.

Introducción

La geotermia es una fuente de energía baja en carbono⁵, versátil, confiable y prácticamente inagotable. Para entender su desarrollo en México, el primer paso es comprender qué límites y posibilidades son inherentes a su naturaleza técnica. Por lo tanto, este capítulo presenta la primera parte del marco teórico de la tesis –la segunda parte se expone en el siguiente capítulo–, con el objetivo de presentar al lector los fundamentos técnicos de la geotermia como fuente de energía y su potencial en México.⁶ La exposición revela que la geotermia tiene múltiples usos y beneficios, entre los cuales destaca la generación de electricidad. Sin embargo, aunque México cuenta con condiciones geológicas privilegiadas que facilitan su aprovechamiento, su nivel de desarrollo se mantiene muy por debajo de su potencial teórico. Para demostrar el argumento, se responden las preguntas: ¿qué es la geotermia, cómo se puede usar, cuáles son sus etapas de desarrollo, dónde se puede aprovechar, cuál es su potencial en México, y cuáles son sus desventajas y ventajas? En sintonía, el capítulo

⁵ En la mayoría de los casos también es renovable, además de baja en carbono. La distinción depende de cómo se maneje el recurso. Por ejemplo, una planta de energía geotérmica (que genera electricidad) se considera renovable con un buen monitoreo de extracción de fluidos geotérmicos y, en la mayoría de los casos, con la reinyección de estos fluidos en el subsuelo. Más adelante se aclara la diferencia entre energías limpias, sustentables, bajas en carbono y renovables. También se ahonda en los distintos usos de la geotermia, entre ellos, la energía geotérmica.

⁶ Por la naturaleza del análisis politológico de la tesis se explican los fundamentos técnicos en términos generales. Es decir, no se ahonda en los principios geológicos, termodinámicos, físicos, químicos y demás para explicar a la geotermia. Para conocer a detalle estos principios, véase: Ingrid Stober y Kurt Bucher, *Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development*, 2ª ed. (Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2021). Tampoco se ahonda en la naturaleza y características técnicas de la geotermia desarrollada en México pues escapa a la formación de la autora. Para conocer más a fondo el estado tecnológico de la geotermia en México véase: Luis C. A. Gutiérrez-Negrín, *2024 Mexico Country Report* (Provisional Draft, IEA Geothermal, July 2025).

se estructura con secciones correspondientes a las respuestas. Para cerrar el capítulo se sintetizan las cualidades positivas de la geotermia como fuente de energía en una tabla que servirá de guía en próximos capítulos y se concluye con reflexiones finales y posibles vías de investigación a futuro.

I. Marco teórico parte I: fundamentos técnicos y tecnológicos

A. ¿Qué es la geotermia?

De origen griego, las raíces etimológicas de “geotermia” la describen literalmente: *geos* significa “la Tierra” y *thermos* “calor”, en conjunto, “calor de la Tierra”.⁷ La vasta mayoría de este calor surge de una irradiación constante del núcleo hasta la superficie terrestre que comenzó con la formación de la Tierra, hace unos 4.5 mil millones de años.⁸ Una parte más pequeña del calor geotérmico viene de la radiación solar que impacta la superficie terrestre y del calor ambiental que se ha acumulado y absorbido durante milenios.⁹ Sin embargo, el origen principal de la geotermia es el flujo térmico desde el núcleo terrestre. Éste surge por el proceso natural de decadencia de los elementos radiactivos del núcleo, que continuará por miles de millones de años, lo que asegura un “suministro esencialmente inagotable” de energía.¹⁰

En el núcleo terrestre, a 6,500 kilómetros de profundidad, la temperatura es similar a la de la superficie solar, a unos 6000 °C.¹¹ Por su parte, en la corteza terrestre hay un amplio rango de temperaturas geotérmicas, entre los miles y algunos grados

⁷ Tanya Ordóñez, *Introducción a la geotermia* (Tegucigalpa: Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Departamento de Física de la Tierra, Carrera de Geología, s. f.), PDF.

⁸ U.S. Department of Energy, *GeoVision: Harnessing the Heat Beneath Our Feet* (Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2019), 10., e International Energy Agency, *The Future of Geothermal Energy* (Paris: IEA, 2024), <https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy>, 12.

⁹ International Energy Agency, *The Future of Geothermal Energy*, 12.

¹⁰ L. Blodgett y K. Slack, *Basics of Geothermal Energy Production and Use* (San Diego, CA: Global Energy Network Association, 2009), citado en U.S. Department of Energy, *GeoVision: Harnessing the Heat Beneath Our Feet* (Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2019), 11.

¹¹ U.S. Department of Energy, *GeoVision*, 10.

Celsius, que varían gracias a distintas condiciones geográficas y geológicas y en particular gracias a la configuración de las placas tectónicas. Por lo tanto, las temperaturas del suelo, lecho rocoso y aguas poco profundas en todas partes del mundo se influyen directamente por la geotermia.¹² Hay lugares donde se pueden apreciar manifestaciones geotérmicas superficiales, como en zonas volcánicas. Las manifestaciones son la prueba visual de la geotermia¹³: fumarolas, manantiales, aguas termales y géiseres.¹⁴ Naturalmente, son un indicador geográfico de geotermia, sin embargo, toda la corteza terrestre tiene un cierto grado de geotermia y la mayoría de este calor se puede usar para fines productivos.¹⁵

Además del calor, la geotermia también es una rama disciplinaria de la geofísica y geología que estudia los fenómenos térmicos del interior del planeta y los procesos necesarios para la explotación industrial del calor en distintos usos.¹⁶ De modo conciso, la geotermia es el “conjunto de las condiciones de las fuentes de calor en el interior de la Tierra y estudio y aprovechamiento de ellas”.¹⁷ Sin embargo, para fines de la tesis, aunque también se explican a detalle sus modos de aprovechamiento y la importancia de su estudio, el concepto se entiende principalmente como calor y fuente de energía.

¹² *Ibid.*

¹³ Rosa María Prol-Ledesma, *El calor de la Tierra*, 3a ed. (México: FCE, SEP, Conacyt, 2002), 30.

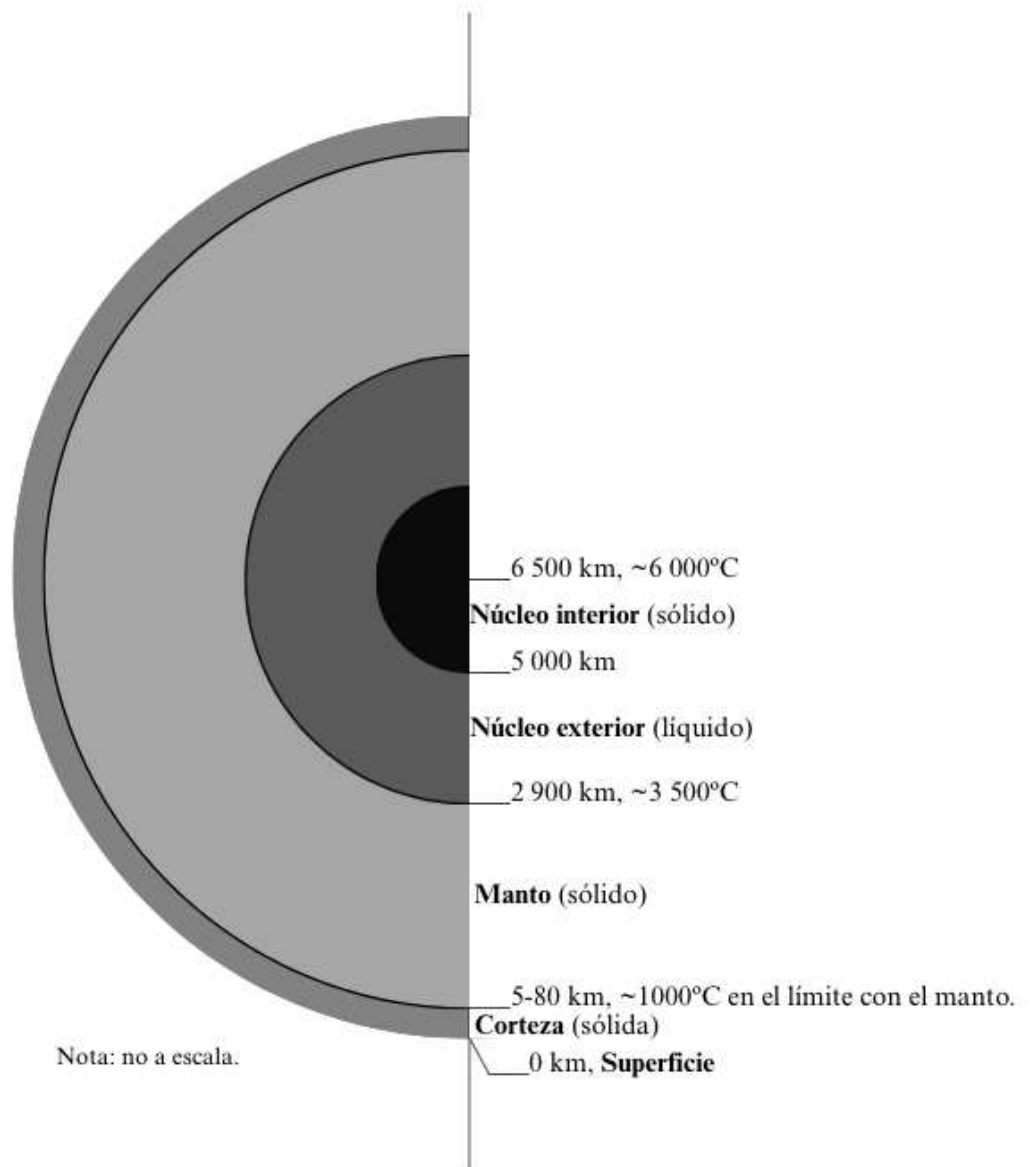
¹⁴ *Ibid.*

¹⁵ *Ibid.*, 11.

¹⁶ Magaly Flores Armenta, "La Energía Geotérmica: Futuro de las Energías Limpias en México," *Perspectivas Energéticas* 6, no. 13 (enero-mayo de 2022): 7.

¹⁷ *Geotermia*, s. f., *Diccionario del español de México (DEM)*, Colegio de México, 10 de julio de 2025, <https://dem.colmex.mx/Ver/geotermia>.

Figura 2. Estructura interna de la Tierra con capas, profundidades y temperaturas promedio.¹⁸



¹⁸ Elaboración propia con datos de: Steven Earle, *Physical Geology*, 2a ed. (Victoria, B.C.: B.C. Campus, 2019), cap. 9.2, "The Temperature of Earth's Interior," <https://opentextbc.ca/geology/chapter/9-2-the-temperature-of-earths-interior/>, Rosa María Prol-Ledesma, *El Calor de la Tierra*, 3a ed. (México: FCE, SEP, Conacyt, 2002), 13., University College London, "The Earth's Interior," UCL Seismin Explore, acceso 17 de julio de 2025, <https://www.ucl.ac.uk/seismin/explore/Earth.html>. y U.S. Department of Energy, *GeoVision: Harnessing the Heat Beneath Our Feet* (Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2019), 10. e International Energy Agency, *The Future of Geothermal Energy* (Paris: IEA, 2024), <https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy>, 10.

B. ¿Cómo se puede usar la geotermia?

La geotermia es una fuente de energía versátil porque se puede aprovechar de muchas formas. Tiene dos tipos principales de aplicaciones: directas y una indirecta. Las directas son las que aprovechan la temperatura de los recursos geotérmicos. Existen varias posibilidades para este uso, en su mayoría industriales y de calefacción, que varían dependiendo del rango de temperatura que se aprovecha. El diagrama de Lindal expuesto a continuación ilustra algunos ejemplos de aplicaciones directas. Por otro lado, la aplicación indirecta es la que utiliza los fluidos calientes para generación de electricidad, mejor conocida como energía geotérmica. De manera simplificada, se usa vapor de los recursos geotérmicos para activar turbinas que generan electricidad. También hay aplicaciones que combinan ambos usos, llamadas aplicaciones o usos mixtos, entre ellas las aplicaciones cascada, que se presentan más adelante. En conjunto, los usos directos y la energía geotérmica –el uso indirecto– aprovechan el calor geotérmico, por lo que son las dos grandes categorías de su aprovechamiento.

Existe otro modo de aprovechamiento de yacimientos geotérmicos que no explota el calor, sino los productos minerales derivados del sitio. Un ejemplo es la extracción de ácido bórico del sitio geotérmico de Larderello, Italia.¹⁹ La disponibilidad de minerales depende de cada yacimiento y la magnitud de la extracción puede ser a escala industrial –como en Larderello– o comunitaria. En México, habitantes de algunos pueblos de Michoacán cerca de manifestaciones termales extraen sales que usan para consumo humano y comercializan a pequeña escala.

Por último, un modo de aprovechamiento prometedor para el futuro es la colaboración de la industria geotérmica y la industria petrolera, principalmente para

¹⁹ José Luis Hernández Galán, *El Aprovechamiento de la Energía de la Tierra*, manuscrito proporcionado por el autor, 91.

transformar pozos petroleros en desuso o poco productivos. La explotación de subproductos minerales y la posible colaboración con la industria petrolera se discuten más a detalle en el quinto capítulo “El futuro de la geotermia”. A continuación se desarrolla en qué consisten los usos directos y la energía geotérmica.

Figura. 3 Diagrama de Lindal²⁰

Rango aproximado de temperatura (°C)	Algunos usos de la geotermia
180	Refrigeración por evaporación de amoniaco
170	Producción de agua pesada
160	Secado de tierras diatomáceas
150	Secado de pescado
140	Secado de madera
130	Obtención de alúmina
120	Enlatado de alimentos
110	Secado de productos agrícolas
100	Evaporación en el refinado de azúcar
90	Extracción de sales por evaporación y cristalización
80	Producción de agua potable por destilación
70	Evaporación con fines diversos
60	Secado de placas de cemento
50	Secado de materiales orgánicos (vegetales, algas, etc.)
40	Lavado y secado de lana
30	Secado de bacalao
20	Procesos intensivos de descongelación
	Calefacción
	Límite inferior de temperatura para procesos de refrigeración
	Invernaderos y ganadería
	Crecimiento de hongos
	Balneología
	Calentamiento de suelos
	Albercas
	Biodegradación
	Fermentación
	Agua caliente para trabajos de minería en climas fríos
	Piscicultura

²⁰ Reproducción de “Figura 20. Diagrama de Lindal” en Prol-Ledesma, *El calor de la Tierra*, 55. En la figura original dice “Algunos usos de la energía geotérmica”. Se cambió a “Algunos usos de la geotermia” dado que anteriormente se puntualizó que en esta investigación “energía geotérmica” se refiere a la producción de electricidad con geotermia. La figura se basa en la investigación de B. Lindal, “Industrial and other applications of geothermal energy (except power production and district heating).” citado en *Geothermal energy: review of research and development*, editado por Christopher H. Armstead, 135 - 148. UNESCO, 1973.

i. Usos directos

El diagrama de Lindal ilustra la variedad y versatilidad de los usos directos. Entre ellos, cabe destacar la climatización geotérmica, o bombas de calor, (GHP, por sus siglas en inglés²¹). Se trata de una tecnología que se ha implementado desde los 1940 y es considerada confiable, silenciosa, eficiente y costo efectivo para la calefacción y enfriamiento de espacios.²² El funcionamiento de las GHP se asemeja a los sistemas de aire acondicionado tradicionales. Empero, a diferencia de ellos, los sistemas GHP no intercambian calor con la atmósfera, fenómeno que provoca islas de calor y aumenta la sensación térmica de los lugares.²³ En contraste, los sistemas GHP hacen su intercambio de temperatura en el subsuelo, sin pérdidas significativas hacia el medio ambiente. Por consiguiente, aumentar el uso de los GHP para la aclimatación de inmuebles contribuye a eliminar el fenómeno de islas de calor y a mitigar el cambio climático.²⁴ En 2020 se alcanzaron los 107 gigavatios térmicos (GWt) de capacidad instalada a nivel mundial, con un promedio de 9% de crecimiento anual entre 2015 y 2020.²⁵ El líder mundial –en términos de capacidad instalada– en el aprovechamiento de usos directos es China.

En México el aprovechamiento de usos directos de geotermia es casi inexistente, salvo por sus usos turísticos y recreativos de aguas termales²⁶, usos comunitarios poco registrados e iniciativas coordinadas por el Centro Mexicano de

²¹ *Geothermal Heat Pumps*.

²² E. Battocletti y W. Glassley, *Measuring the Costs and Benefits of Nationwide Geothermal Heat Pump Deployment* (Bob Lawrence & Associates, Inc, 2013) citado en U.S. Department of Energy, *GeoVision: Harnessing the Heat Beneath Our Feet* (Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2019), 11.

²³ Hirofumi Muraoka, "Geothermal Energy," en *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*, ed. Wei-Yin Chen, Maximilian Lackner y Toshio Suzuki (Nagoya: Springer, 2017), 2062.

²⁴ *Ibid.*

²⁵ International Renewable Energy Agency (IRENA), *Global Geothermal Market and Technology Assessment*, consultado el 29 de julio, 2024, <https://www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global-geothermal-market-and-technology-assessment>.

²⁶ José Romo Jones y Laura Vélez Andrade. *CeMIEGeo: Contribución a la sociedad y al conocimiento*. (Ensenada: CICESE, 2023), 16.

Innovación y Energía Geotérmica (CeMIEGeo).²⁷ A ciencia cierta es difícil saber cuántos usos hay en el país porque no existe un registro oficial de sus aplicaciones directas. También ha habido programas piloto en las plantas geotermoeléctricas de CFE pero no se les ha dado continuidad. Una iniciativa de CeMIEGeo es la deshidratación de alimentos en Nayarit en las comunidades agricultoras colindantes con la planta geotérmica Domo de San Pedro –que en realidad es un uso directo dentro de un *aprovechamiento cascada*: categoría discutida más adelante–. CeMIEGeo también desarrolló proyectos de instalación de once equipos de bombas de calor con una capacidad total instalada de 133 kilovatios térmicos.²⁸ Estos impulsos de aplicaciones geotérmicas directas en el país no datan de más de una década y surgieron a partir de la iniciativa del CeMIEGeo o de iniciativas de universidades como la UNAM.²⁹ A futuro, los efectos del cambio climático en las estaciones mexicanas podrían aumentar el uso de usos directos para aclimatación de espacios, particularmente en el centro del país.³⁰

ii. Uso indirecto: generación de electricidad

La generación de electricidad con geotermia –mejor conocida como “energía geotérmica”– es un uso indirecto porque no se aprovecha el calor como producto final, sino que se utiliza para la producción eléctrica. Hay métodos de generación

²⁷ El CeMIEGeo es el producto de una alianza entre academia e industria con apoyo gubernamental “con el objetivo de promover y acelerar el uso y el desarrollo de la energía geotérmica en nuestro país.” Centro Mexicano para la Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo), “Quiénes somos,” *CEMIE-Geo*, consultado el 18 de agosto de 2025, <https://cemiegeo.org/index.php/quienes-somos>.

²⁸ Romo Jones y Vélez Andrade, *CeMIEGeo*, 25.

²⁹ A lo largo de la investigación se retomará la discusión de los programas de fomento e investigación de la geotermia.

³⁰ Luis Carlos Gutiérrez Negrín, “Usos directos de la geotermia: un potencial desaprovechado en México,” *e-Management*, 7 de septiembre de 2017, <https://e-management.mx/2017/09/07/usos-directos-de-la-geotermia-un-potencial-desaprovechado-en-mexico>.

convencionales y no convencionales. Los convencionales son los más comunes y los utilizados comercialmente hoy en día. En cambio, los no convencionales siguen en investigación, en programas piloto o apenas comienzan operaciones comerciales en algunos países –no en México–. A grandes rasgos, ambos tipos de generación funcionan con la premisa básica de utilizar fluidos o vapores geotérmicos para activar turbinas que generan electricidad. En otras palabras, se utilizan reservas subterráneas de aguas. Se accede a ellas mediante pozos que transportan los fluidos hacia la superficie, en donde está la planta geotermoeléctrica. Es importante destacar que estas aguas no son de acuíferos potables. Tampoco se trata de agua pura, sino de fluidos o salmueras minerales cuya composición específica depende de las condiciones geológicas del área. Por lo tanto, explotar yacimientos geotérmicos con un buen manejo no compromete acuíferos para consumo humano.

La diferencia entre la generación convencional y no convencional son los tipos de yacimientos a los que se accede. La geotermia convencional explota yacimientos subterráneos “hidrotermales”. Estos tienen tres elementos básicos: calor, fluidos y permeabilidad.³¹ En conjunto, estos elementos posibilitan que fluidos geotérmicos –aguas subterráneas– circulen entre las rocas calientes del subsuelo. Los sistemas hidrotermales corresponden al grueso de la generación comercial de electricidad con geotermia. Entre las distintas tecnologías de generación geotermoeléctrica, a grandes rasgos, se perforan pozos que penetran a un rango de entre 1 y 3.5 kilómetros (km) de profundidad³² para acceder a yacimientos geotérmicos con temperaturas mayores a 150°C, alrededor de los 350°C y extraer vapor o agua subterránea y activar las turbinas que generan electricidad. La tecnología existente de excavación de pozos convencionales permite acceder a recursos geotérmicos hasta los 7 km de

³¹ Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, “*Enhanced Geothermal Systems*,” consultado el 2 de julio, 2024, <https://www.energy.gov/eere/geothermal/enhanced-geothermal-systems>.

³² Flores Armenta, “La Energía Geotérmica: Futuro de las Energías Limpias en México”, 7.

profundidad.³³ A modo de comparación, la profundidad promedio de los pozos en tierra³⁴ construidos de gas y petróleo en Estados Unidos (EE UU) en 2017 fue de 3 km.³⁵

Las tecnologías convencionales tienen tres grandes tipos de plantas: plantas de vapor seco, plantas de vapor instantáneo y plantas de ciclo binario. Fueron desarrolladas en ese orden con el propósito de expandir los lugares y tipos de yacimientos geotérmicos que se podían explotar. En otras palabras, las plantas de vapor seco se limitan a explotar yacimientos con ciertas características; las de vapor instantáneo *desbloquearon* otros yacimientos para explotar y lo mismo ocurrió con las de ciclo binario. De tal manera, cada innovación tecnológica en plantas extendió la posibilidad de aprovechamiento geotérmico para generación de electricidad. A continuación se exponen sus rasgos generales.

Tabla 1. Tipos de plantas geotermoeléctricas convencionales³⁶	
Plantas de vapor seco <i>Dry steam power plants</i>	Vapor del yacimiento va directamente a una turbina.
Plantas de vapor instantáneo <i>Flash power plants</i>	Se usa para fluidos hidrotermales con temperaturas superiores a los 175°C. Los fluidos a gran presión se evaporan rápidamente (casi al instante) al rociarse dentro de un tanque de baja presión.
Plantas de de ciclo binario <i>Binary-cycle power plants</i>	Se usa para fluidos con temperaturas menores a 175°C. El fluido geotérmico cede calor a un fluido secundario (con un punto de ebullición bajo y presión de vapor alta a bajas temperaturas) mediante intercambiadores de calor, en donde el fluido se calienta y evapora. El vapor producido impulsa a una turbina axial ³⁷ y luego se enfría y condensa. Después, el ciclo comienza de nuevo.

³³ U.S. Department of Energy, *GeoVision*, 11.

³⁴ *Onshore*.

³⁵ U.S. Department of Energy, *GeoVision*, 11.

³⁶ Elaboración propia a partir de la clasificación de Peter Birkle en su capítulo de libro: Peter Birkle, "Development of Geothermal Energy in México and Its Energetic Potential for the Future," en *Towards a Cleaner Planet*, eds. Juan Klapp, Jorge L. Cervantes-Cota y José F. Chávez Alcalá (Berlin y Heidelberg: Springer, 2007), 343-363. Se incluyen los nombres de las plantas en inglés por su utilidad técnica.

³⁷ Las turbinas axiales son un tipo de turbina comúnmente empleado para el manejo de fluidos. También se usan para la generación de electricidad con gas e hidroeléctricas.

Las tecnologías no convencionales se refieren a los *Enhanced Geothermal Systems* o a los *Advanced Geothermal Systems* (AGS) mencionados previamente. Los primeros se basan en la premisa de inyectar agua a la roca caliente para fracturarla y hacerla permeable o incrementar las fracturas existentes y posteriormente extraer los fluidos calentados para la generación de electricidad. Los segundos funcionan haciendo circuitos cerrados de pozos para calentar fluidos constantemente y aprovecharlos a temperaturas muy altas. Ambas tecnologías siguen en su etapa de investigación y desarrollo, no obstante, tienen grandes expectativas puesto que –de manera similar a las innovaciones de plantas anteriores– su éxito tiene el potencial hacer a la energía geotérmica accesible en casi todas partes y abaratar su costo. En particular, otra característica alentadora de los EGS es que se pueden utilizar en pozos geotérmicos existentes –sin necesidad de excavar nuevos– que fueron abandonados o que terminaron su vida productiva. El *Department of Energy* (DOE) de EE UU financió un proyecto de ESG en un pozo abandonado al norte de California que añadió 5.8 MW a la generación existente.³⁸ El DOE también facilitó el desarrollo de EGS en Nevada y actualmente financia un proyecto de investigación al respecto en Utah operado por el *Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy*. Tanto los EGS como los AGS se retoman en el último capítulo por sus implicaciones para el desarrollo futuro de la geotermia.

Globalmente, la capacidad instalada de geotermia en 2020 se estimó en 10 gigavatios (GW), con 90% de la instalación repartida entre Islandia, Indonesia, Italia, Japón, México, Nueva Zelanda, Filipinas y Estados Unidos.³⁹ Para finales de 2023 la capacidad instalada aumentó a 16.3 GW y los diez países líderes fueron: 1) EE UU

³⁸ Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, “Enhanced Geothermal Systems.”

³⁹ G. W. Huttner, *Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report*, World Geothermal Congress (Reykjavik: International Geothermal Association, 2020) citado en M. Soltani et al., “Environmental, Economic, and Social Impacts of Geothermal Energy Systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140 (2021), 2.

con 3,900 megawatts (MW), 2) Indonesia con 2,418 MW, 3) Filipinas con 1,952 MW, 4) Turquía con 1,691 MW, 5) Nueva Zelanda con 1,042 MW, 6) Kenia con 985 MW, 7) México con 976 MW, 8) Italia con 916 MW, 9) Islandia con 754 MW y 10) Japón con 576 MW.⁴⁰ México es uno de los países con mayor capacidad instalada históricamente. Hoy en día ocupa el séptimo lugar; no obstante, en 1990 ocupaba el tercero con 700 MW después de EE UU y Filipinas.⁴¹ Las razones de por qué el país sólo aumentó su capacidad 274 MW en casi cinco lustros se explorarán a lo largo de la investigación. A pesar de ser una fuente de energía que se usa cada vez más, a nivel mundial la energía geotérmica sólo representa 0.5% de la capacidad instalada de energías renovables⁴² y todavía menos de la mezcla energética total.⁴³

iii. Plantas geotermoeléctricas mexicanas

La primera planta geotermoeléctrica del país se construyó en 1956 e inició operaciones en 1959 en Pathé, Hidalgo. Operó hasta 1973 y fue la primera planta comercial en el continente americano. Seis décadas después, México tiene cinco plantas geotérmicas en operación: cuatro a concesión de la Comisión Federal de Electricidad (CFE): Cerro Prieto, Baja California, Los Azufres, Michoacán, Los Humeros, Puebla y Las Tres Vírgenes, Baja California Sur; y una bajo concesión privada, de Grupo Dragón (el ala energética de Grupo Salinas): Domo de San Pedro, Nayarit. La capacidad total instalada de energía geotérmica en el país sumó 1005.0

⁴⁰ “TOP 10 países con mayor capacidad de generación de energía geotérmica instalada en 2023”. Plataforma española tecnológica y de innovación en geotermia, consultado el 22 de julio, 2024, <https://blog.geoplat.org/2024/01/09/top-10-paises-con-mayor-capacidad-de-generacion-de-energia-geotermica-instalada/>.

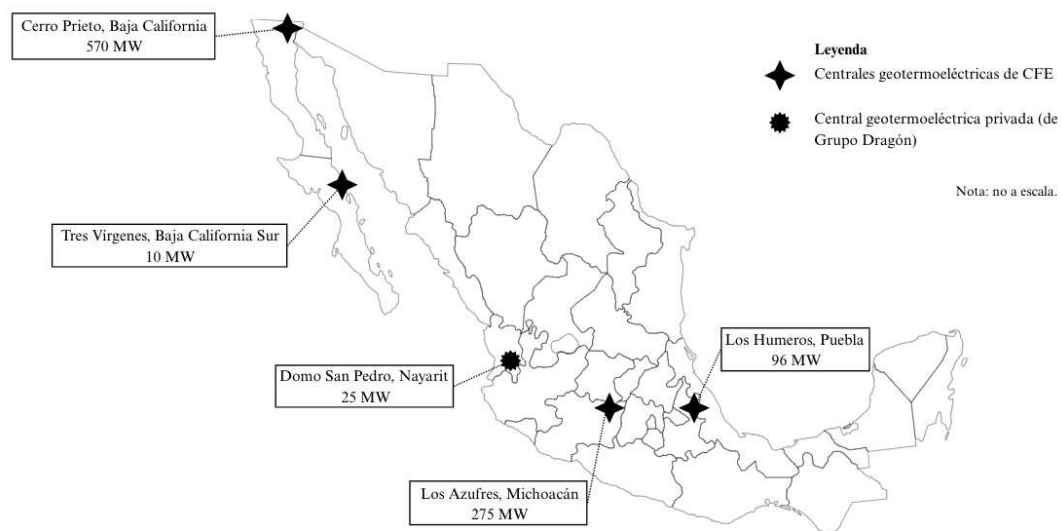
⁴¹ Vicente Torres Rodríguez, coord., *Geotermia en México* (Programa Universitario de Energía, Coordinación de la Investigación Científica, Universidad Nacional Autónoma de México, 1993), 146.

⁴² IRENA, *Global Geothermal Market and Technology Assessment*.

⁴³ “Geothermal energy, powered by Earth”, Energy Observer, consultado el 27 de julio de 2024, <https://www.energy-observer.org/resources/geothermal-energy>.

MW en 2022.⁴⁴ Esto representa menos de 2% de la electricidad producida en México en total⁴⁵, mientras el 89.9% sigue proviniendo de la quema de hidrocarburos.⁴⁶

Figura 4. Mapa de centrales geotermoeléctricas mexicanas⁴⁷



iv. ¿Cuáles son las etapas de desarrollo de proyectos geotermoeléctricos?

A la hora de diseñar y construir una planta geotérmica de electricidad, hay tres etapas generales con lógica de pasos para el desarrollo de cualquier proyecto; cada etapa con su temporalidad promedio.⁴⁸ En primer lugar está el reconocimiento de la superficie, la exploración, el descubrimiento del recurso y las evaluaciones para verificar la disposición del mismo. Este proceso suele tardar de dos a tres años. En segundo va la excavación y construcción del pozo y la planta, que tarda de tres a cinco años. En

⁴⁴ Flores, *Ibid*, p. 9.

⁴⁵ *Ibid.*, p. 8.

⁴⁶ *Our World in Data*, "Mexico," consultado el 21 de abril de 2024, <https://ourworldindata.org/energy/country/mexico>.

⁴⁷ Elaboración propia con datos de SENER, *Balance Nacional de Energía 2023*, 53.

⁴⁸ M. Soltani et al., "Environmental, Economic, and Social Impacts of Geothermal Energy Systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140 (2021), 9.

tercer y último lugar está la operación de la planta que a su vez está ligada a la “vida” de explotación de las reservas geotérmicas, que suele durar unos veinte o treinta años, en promedio, pero se puede extender con un buen manejo del recurso.⁴⁹ Como se puede apreciar, cada etapa toma un tiempo considerable para completarse. Para comenzar operaciones se requieren, en promedio, cinco años. Esta característica de los proyectos geotérmicos puede ser desalentadora para su fomento e inversión, tanto para inversionistas privados, así como para el sector público. En términos de ciclos políticos, si se impulsa un proyecto de energía geotérmica puede que los beneficios no se reciban hasta el próximo ciclo o gobierno, lo que reduce su popularidad. Más adelante se presentan otros retos de la energía geotérmica y de la geotermia en general. También se presentan sus ventajas comparativas.

v. Usos mixtos o aprovechamiento cascada

Los usos mixtos o aprovechamiento cascada son aquellos que maximizan el calor residual de una aplicación en particular. Por ejemplo, aprovechar el agua residual de plantas geotermoeléctricas para aplicaciones directas; en lugar de reinyectarla al suelo o desecharla a lagunas de evaporación. En Islandia transportan con tuberías el agua excedente de la generación de electricidad a tanques de almacenamiento para después distribuirla a inmuebles y utilizarla en sistemas de bombas de calor.⁵⁰ En México, los deshidratadores de alimentos en Nayarit son un ejemplo de aprovechamiento cascada porque el calor de los deshidratadores es residuo del Domo de San Pedro.

⁴⁹ G. Axelsson et al., “Sustainable Management of Geothermal Resources and Utilisation for 100–300 Years,” en *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turquía, 24-29 de abril de 2005 citado en Bernard Goldstein et al., "Geothermal Energy," en IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, ed. Ottmar Edenhofer et al. (Cambridge: Cambridge University Press, 2011), p. 408.

⁵⁰ Muraoka, "Geothermal Energy," 2079.

Teóricamente, el “aprovechamiento cascada” puede extenderse hasta que se agoten las posibilidades de uso del calor residual.

vi. Extracción de productos minerales derivados

Extraer productos minerales de las aguas geotérmicas es otra manera de aprovechar los yacimientos geotérmicos. La posibilidad de esta aplicación varía entre cada sitio; sin embargo, donde es factible, puede aumentar los usos productivos del yacimiento. Ejemplos de este aprovechamiento son la extracción de gas carbónico en Estados Unidos (EEUU) y el ácido bórico en Italia.⁵¹ En México hubo un intento de extracción de cloruro de potasio –utilizado como fertilizante– de la planta Cerro Prieto, sin embargo, se frenó por decisiones gubernamentales.⁵² El caso se retoma en el siguiente capítulo. En años recientes se ha descubierto que también se pueden explotar minerales críticos de salmueras geotérmicas, particularmente litio. Esta posibilidad se discute con mayor detalle en el quinto capítulo por sus implicaciones para el futuro de la geotermia y su posible desarrollo en México.

C. ¿Dónde se puede aprovechar?

Existen distintos tipos de recursos geotérmicos que determinan sus posibilidades de uso, accesibilidad y, por consiguiente, influyen en la posibilidad de su desarrollo. A continuación, se presentan los recursos de alta temperatura, los de menor temperatura, los recursos no convencionales, los recursos poco profundos y los recursos asociados a combustibles fósiles. Los recursos o reservas de alta temperatura se utilizan para generación eléctrica convencional. Son fácilmente accesibles con pozos de 2 a 3km de

⁵¹ José Luis Hernández Galán, *El Aprovechamiento de la Energía de la Tierra*, manuscrito proporcionado por el autor, 91.

⁵² *Ibid.*

profundidad y sus temperaturas pueden superar los 200°C. Estas reservas geotérmicas son de muy alta calidad dado que el calor se concentra en rocas permeables y hay agua subterránea que circula entre las rocas.⁵³ El fenómeno es común en los límites de placas tectónicas, por lo que este tipo de recursos se encuentra en pocos lugares alrededor del mundo. En México hay varios gracias a que el territorio nacional se sitúa sobre cinco placas: la Norteamericana, del Pacífico, de Cocos, la del Caribe y la microplaca de Rivera.⁵⁴

Los recursos de menor temperatura se encuentran más lejos de los límites de las placas y representan una buena calidad de reservas accesibles de 3 a 5 kms de profundidad. Suelen tener una temperatura menor a 150°C y se pueden usar para generar electricidad, la mayoría de los casos con tecnologías de ciclo binario.⁵⁵ Los recursos no convencionales tienen temperaturas altas; pero faltan, o son escasos, los otros dos elementos básicos de los recursos convencionales: la permeabilidad y los fluidos subterráneos. La abundancia de los recursos no convencionales a nivel mundial los hace atractivos por su gran potencial.⁵⁶ Sin embargo, no se pueden explotar con las tecnologías hidrotermales convencionales. Para acceder a los recursos no convencionales y explotarlos, se emplean tecnologías como los *Enhanced Geothermal Systems* (EGS) o los *Advanced Geothermal Systems* (AGS) mencionados anteriormente.

Los recursos geotérmicos de suelos poco profundos se aprovechan para usos directos. Sus temperaturas suelen ser de menos de 60°C y son accesibles sin necesidad de excavaciones profundas, lo que facilita significativamente su desarrollo a

⁵³ Araújo, ed., *Routledge Handbook of Energy Transitions.*, 24.

⁵⁴ Servicio Geológico Mexicano, “Evolución de la tectónica en México”, *Museo Virtual de Riesgos Geológicos*, publicada el 22 de marzo de 2017, consultado el 27 de julio de 2024, <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Evolucion-tectonica-Mexico.html>.

⁵⁵ Araújo, ed., *Routledge Handbook of Energy Transitions*, 241.

⁵⁶ Romo Jones y Vélez Andrade, *CeMIEGeo*, 31.

comparación de las plantas geotermoeléctricas. Por último, otro tipo de recursos geotérmicos son los asociados a actividades de explotación de combustibles fósiles, útiles tanto para aplicaciones directas como para generar electricidad. Para usos directos es posible utilizar el agua de minas de carbón abandonadas, que suelen mantener una temperatura constante entre 18°C y 34°C a lo largo del año.⁵⁷ En España, por ejemplo, la empresa Barredo Colliery utiliza dichas aguas para calentar 245 edificios residenciales y 2 públicos.⁵⁸ Por otro lado, para generar electricidad es posible utilizar pozos petroleros o de gas existentes para co-producir energía geotérmica o incluso darles el propósito geotérmico a pozos abandonados o cuyo yacimiento de combustible fósil ya se agotó.⁵⁹ Dado que México es un país con una amplia trayectoria petrolera, las posibilidades de desarrollo que ofrecen este tipo de recursos son dignas de ahondamiento: el tema se revisará con más detalle en el quinto capítulo.

D. Potencial de la geotermia en México

Dadas las condiciones geológicas que tienen que presentarse para yacimientos geotérmicos óptimos para su explotación cerca de la superficie terrestre, la geotermia es un “privilegio” que sólo un grupo reducido de países donde hay volcanes activos u otro fenómeno geológico pueden explotar con facilidad.⁶⁰ Entre ellos, México subscribe al privilegio de tener recursos geotérmicos accesibles. Por lo tanto, se podría decir que la geotermia es una fuente de energía autóctona mexicana. De ahí el temprano desarrollo de la energía geotérmica en el país, desde la década de los años

⁵⁷ Araújo, ed., *Routledge Handbook of Energy Transitions*. 241.

⁵⁸ *Ibid.*

⁵⁹ *Ibid.*

⁶⁰ Bernard Goldstein et al., "Geothermal Energy," en IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, ed. Ottmar Edenhofer et al. (Cambridge: Cambridge University Press, 2011), 423.

cincuenta. El potencial geotérmico de México es un tema que se ha debatido durante décadas. Distintos métodos de estimación concluyen distintas aproximaciones. Gerardo Hiriart⁶¹ coordinó un informe de evaluación de la energía geotérmica en México para el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la antigua Comisión Reguladora de Energía (CRE) –reemplazada por la actual Comisión Nacional de Energía (CNE)– en donde compila las distintas estimaciones de potencial geotérmico que se han realizado de 1975 a 2011. La estimación más reciente, publicada por Ordaz-Méndez *et al.* en 2011, declara un potencial de 9686 MW, casi diez veces la capacidad instalada en el mismo año.⁶² Una estimación más reciente del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) calculó el potencial de los EGS en México y concluyó un potencial de 47,350 MW, al considerar profundidades entre 3 y 7 km.⁶³ Otra estimación expuesta por el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) encontró que si se consideran temperaturas mayores a 150°C y profundidades máximas de 6km, el potencial estimado es de 20,500 MW; alrededor de veinte veces la capacidad instalada actual.⁶⁴ Como se mencionó, existen más estimaciones pero, al igual que las expuestas, la conclusión general es que el potencial geotermoeléctrico de México es significativamente más alto que la capacidad instalada actual. A modo de ilustración, la demanda bruta nacional de electricidad es de 43,828 MW⁶⁵ Al comparar las estimaciones de potencial con la demanda eléctrica se puede apreciar que el aprovechamiento máximo de la geotermia podría cubrir una parte importante de la demanda.

⁶¹ Gerardo Hiriart laboró más de 25 años en la Comisión Federal de Electricidad, en donde fue Gerente Nacional de Geotermia por más de 10 años. También tiene una trayectoria académica en la Universidad Nacional Autónoma de México y ha liderado proyectos geotérmicos desde el sector privado.

⁶² Gerardo Hiriart Le Bert, *Evaluación de la Energía Geotérmica en México* (Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía, México, DF, mayo de 2011), 10.

⁶³ Romo Jones y Vélez Andrade, *CeMIEGeo*, 31, 32.

⁶⁴ *Ibid.*, 33.

⁶⁵ Demanda bruta nacional del 18 de agosto de 2025. Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), “Gráfica de Demanda,” *CENACE*, consultado el 18 de agosto de 2025, <https://www.cenace.gob.mx/graficademanda.aspx>.

<i>Tabla 2. Estimaciones de potencial geotermoeléctrico en México comparadas con la demanda eléctrica nacional⁶⁶</i>			
Estimación de potencial	Estimación a partir de	MW estimados	Porcentaje de la demanda nacional de electricidad (43,828 MW)
Ordaz-Méndez <i>et al.</i> en BID - CRE	1300 localidades termales con yacimientos hidrotermales de baja a alta temperatura ⁶⁷	9686	22.10%
INEEL	Potencial de EGS en México	47,350	108.03%
CeMIEGeo	Consideración de temperaturas mayores a 150°C y profundidades máximas de 6 km	20,500	46.77%

A la fecha, la exploración geotérmica nacional se limita a prospectos en tierra. No obstante, también es posible aprovechar la geotermia marítima para generación de electricidad. El trabajo de exploración e investigación que esto requiere es novedoso. En la última década México ha sido pionero en el tema junto a proyectos en Islandia y Noruega.⁶⁸ Aunque faltan estudios para cuantificar el potencial de la geotermia marítima mexicana, el Mar de Cortés y la costa del Pacífico se reconocen como zonas con varios sitios prometedores.⁶⁹

⁶⁶ Elaboración propia con datos de CENACE, “Gráfica de Demanda.”, Hiriart Le Bert, *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*, 11 y Romo Jones y Vélez Andrade, *CeMIEGeo*, 31 - 33.

⁶⁷ Hiriart Le Bert, *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*, 11.

⁶⁸ *Ibid.*, 37.

⁶⁹ Gerardo Hiriart Le Bert, *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*. Presentación de diapositivas, CRE, sin fecha, <https://www.cre.gob.mx/documento/2027.pdf>

El potencial nacional de los usos directos tampoco se conoce a ciencia cierta. A nivel mundial, se estima que el potencial de aplicaciones no eléctricas es “varios órdenes superior” a la generación de electricidad.⁷⁰ El caso es similar en México, con un potencial de usos directos mucho mayor al de energía geotérmica. Sin embargo, hasta ahora no ha existido una estrategia nacional para desarrollarlos. Algunos primeros esfuerzos para fomentarlos han sido el Mapa de Ruta Tecnológica de Usos Directos del Calor Geotérmico publicado por la SENER en 2018 –al final del gobierno de Peña Nieto– y el Aprovechamiento Geotérmico Exento que dicta la Ley de Geotermia vigente. El primero no dio resultados relevantes y el segundo apenas entró en vigor. El fomento de los usos directos se discute más adelante en la investigación, en el cuarto y quinto capítulo, respectivamente.

Como se puede apreciar, las estimaciones del potencial geotérmico del país son diversas y tienen brechas importantes. No obstante, queda claro que México tiene más recursos geotérmicos por explotar tanto para generar electricidad, así como para aplicaciones directas. El potencial fija un punto de partida para el desarrollo geotérmico; en palabras del CeMIEGeo “hace patente la necesidad de contar con una base tecnológica mexicana y con el conocimiento especializado necesario para aprovechar esta nueva fuente de energía.”⁷¹

E. Desventajas de la energía geotérmica

Los retos a los que del desarrollo de la energía geotérmica dependen en gran medida de las condiciones geológicas y al contexto político social de cada sitio en específico. Empero, hay retos generalizables que se ligan a la naturaleza de la tecnología y a las

⁷⁰ Peter Birkle, “Development of Geothermal Energy in México and Its Energetic Potential for the Future,” en *Towards a Cleaner Planet*, eds. Juan Klapp, Jorge L. Cervantes-Cota y José F. Chávez Alcalá (Berlín y Heidelberg: Springer, 2007), 347. La cita es una traducción propia del inglés de “various orders higher”.

⁷¹ Romo Jones y Vélez Andrade, *CeMIEGeo.*, 33.

etapas generales de construcción de plantas. Estos son: el alto riesgo en las etapas de exploración y excavación de pozos, los altos costos e inversión, las externalidades ambientales de la energía geotérmica y la aceptación social de los proyectos.

El objetivo de la exploración de yacimientos geotérmicos es determinar con la mayor precisión posible dónde excavar los pozos de extracción. Sin embargo, no hay certeza total de la calidad del yacimiento hasta la construcción de los pozos y es posible que estos no le atinen directamente al yacimiento. En este sentido la geotermia es muy riesgosa en sus primeras etapas. Ésta es una de las principales razones que desincentivan su inversión

Los altos costos de la geotermia son un argumento popular para explicar la escasez de la geotermia en la mezcla energética mundial y nacional. Sin embargo, es necesario ahondar en este argumento porque los costos de la geotermia no son homogéneos en todas sus etapas de desarrollo. A grandes rasgos, los costos son altos en la etapa de construcción de las plantas, pero son bajos e incluso menores a otras fuentes de energía una vez en operación. En la exploración, la perforación de pozos es particularmente cara y se correlaciona con la profundidad del pozo. Aunado a esto, el proceso conlleva mucha incertidumbre porque la calidad de la reserva geotérmica no está asegurada hasta la construcción del pozo.⁷² Además, los precios de excavación pueden no ser estables porque responden a los ciclos de las industrias de gas y petróleo.⁷³ Con esto en mente, en promedio, los costos de exploración son de 1 a 10 mdd y los de construcción varían entre 2.5 y 50 mdd, dependiendo del tamaño de la planta.⁷⁴

⁷² Romo Jones y Vélez Andrade, *CeMIEGeo*, 33. Cabe destacar que la incertidumbre sobre la calidad de yacimientos también es un problema para la explotación de los hidrocarburos, sin embargo esto no ha impedido desarrollar la industria petrolera.

⁷³ International Renewable Energy Agency (IRENA), *Renewable Power Generation Costs in 2022* (Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2023), 170.

⁷⁴ M. Soltani, Farshad Moradi Kashkooli, Mohammad Souri, Behnam Rafiei, Mohammad Jabarifar, Kobra Gharali y Jatin S. Nathwani, “Environmental, Economic, and Social Impacts of Geothermal Energy Systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140 (2021), 8.

En cuanto a la generación, los costos nivelados de electricidad (LCOE, por sus siglas en inglés⁷⁵) de la energía geotérmica entre 2021 y 2022 promediaron en 0.056 USD/kWh. A modo de comparación, el promedio mundial de LCOE de energías renovables, en el mismo periodo, fue de 0.049USD/kWh.⁷⁶ Estos costos posicionan a la geotermia como una tecnología competitiva para generación de electricidad, incluso frente a sus contrapartes fósiles. Asimismo, los costos geotérmicos también están asociados a las innovaciones tecnológicas; por consiguiente, están pronosticados a bajar en tanto la tecnología avance y se vuelva más accesible, en especial la geotermia no convencional. Respecto a los usos directos, de manera similar a la electricidad, los costos de instalación son altos. Por ejemplo, para la instalación de un sistema de aclimatación con 8 KW de capacidad, el costo de instalación de los circuitos subterráneos corresponde a un 50% del costo total.⁷⁷

Por ser baja en carbono, los impactos ambientales de la geotermia representan una mejora significativa en comparación a los combustibles fósiles. Sin embargo, es importante recordar que todos los tipos de explotación de energía tienen externalidades ambientales. Conocer las de la geotermia es necesario para su análisis riguroso.⁷⁸ A continuación se exponen los principales efectos ambientales que Soltani *et al.*⁷⁹, describen en su revisión de literatura *Environmental, economic, and social*

⁷⁵ *Levelized Costs of Electricity*

⁷⁶ IRENA, *Renewable Power Generation Costs in 2022, 2023*, 19. Las energías renovables que se consideraron en el análisis de los costos fueron: solar fotovoltaica, eólica fuera de costa, eólica dentro de costa, solar concentrada, bioenergía, geotérmica e hidráulica.

⁷⁷ Soltani et al., “Environmental, Economic, and Social Impacts of Geothermal Energy Systems,” 8.

⁷⁸ *Ibid.*, 1.

⁷⁹ M. Soltani está afiliado al *Department of Mechanical Engineering* de la *K. N. Toosi University of Technology*, en Teherán, Irán; al *Department of Electrical and Computer Engineering* de la *University of Waterloo*, en Waterloo, Ontario, Canadá; al *Waterloo Institute for Sustainable Energy (WISE)* de la *University of Waterloo*; y al *Advanced Energy Initiative Center del Multidisciplinary International Complex* en la *K. N. Toosi University of Technology*. Sus coautores son Farshad Moradi Kashkooli, perteneciente al *Department of Mechanical Engineering* de la *K. N. Toosi University of Technology* y al WISE de la *University of Waterloo*; Mohammad Souri, Behnam Rafiei y Mohammad Jabarifar también adscritos al *Department of Mechanical Engineering* de la *K. N. Toosi University of Technology*; Kobra Gharali es miembro del WISE y del *Department of Mechanical Engineering* de la Universidad de Teherán; por último, Jatin S. Nathwani forma parte del WISE y del *Department of Management Science/Civil & Environmental Engineering* de la *University of Waterloo*. *Ibid.*, 1.

impacts of geothermal energy systems publicada en 2021. Soltani y sus coautores clasificaron los impactos ambientales de la geotermia en directos e indirectos. Los directos abarcan los impactos al suelo, las emisiones atmosféricas, el consumo del agua, los residuos y el ruido. Los indirectos son aquéllos relacionados a la construcción del proyecto per se.⁸⁰ En seguida se desarrollan ambos tipos.

Los impactos en el suelo resultan de las intervenciones geológicas que conlleva la explotación geotérmica. En particular, la reinyección de fluidos posterior a su utilización puede tener efectos adversos en caso de un mal manejo. Tanto la extracción como la reinyección implican cambios de presión en el suelo. Los cambios de presión mal monitoreados pueden causar hundimientos o expansiones de suelo y posiblemente dañar estructuras aledañas. Además, en casos extremos, la explotación de la energía geotérmica puede inducir actividad sísmica. La magnitud de sismicidad no suele ser alta, menor a los 4 Magnitud de Locación (ML). Un caso que destaca es el de la planta Phang EGS en Corea, que causó un sismo de 5.4 ML lesionados.⁸¹ Sin embargo, hay estrategias de manejo de planta para controlar los riesgos asociados al suelo, tales como el balance de producción y las tasas de inyección, monitoreo de deformaciones locales de suelo y de la presión de la reserva, además de prever la construcción de instalaciones resilientes y sistemas de advertencia.⁸² La sismicidad puede darle mala reputación a la geotermia, sin embargo, también es una externalidad de la explotación de gas y petróleo. Esto no significa que sea menos grave, pero es importante señalar que no es un efecto exclusivo de la explotación geotérmica. El lado positivo de la geotermia relacionado al suelo es que ocupa un área superficial relativamente pequeña en comparación a otras fuentes de energía . En promedio, el

⁸⁰ *Ibid.*

⁸¹ K.-H. Kim, J.-H. Ree, Y. Kim, S. Kim, S.-Y. Kang y W. Seo, “Assessing Whether the 2017 Mw 5.4 Pohang Earthquake in South Korea Was an Induced Event,” *Science* 360 (2018): 1007–1009. en Soltani et al., “Environmental, Economic, and Social Impacts of Geothermal Energy Systems,” 4.

⁸² Soltani et al., “Environmental, Economic, and Social Impacts of Geothermal Energy Systems,” 4.

área de las plantas geotermoeléctricas es veinte veces menor a la de una planta solar fotovoltaica y de treinta a treinta y cinco veces más pequeña que una planta de combustible fósil.⁸³

Las emisiones atmosféricas de la geotermia son un impacto ambiental a considerar. Sin embargo, sus bajos niveles constituyen en realidad un beneficio. Las emisiones se liberan en el proceso de extracción de las aguas subterráneas. Éstas suelen contener gases disueltos; entre ellos, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, amoníaco y metano. Los gases se liberan durante la despresurización y enfriamiento del fluido y generan productos de oxidación tales como dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno.⁸⁴ Además del CO₂, el metano es un gas de efecto invernadero (GEI) particularmente dañino para la capa de ozono y su efecto invernadero es alto. A pesar de ello, la contaminación del aire de las plantas geotérmicas suele ser baja y la concentración de los compuestos que se acumulan en la superficie puede mitigarse con sistemas de filtración y un buen manejo de residuos. Asimismo, comparada con otras renovables la geotermia tiene menos emisiones que la energía solar y la biomasa.⁸⁵

El consumo de agua de la geotermia es inherente a la tecnología. Sin embargo, es importante notar que las reservas de agua que se explotan para la energía geotérmica no son potables. En varios casos ni siquiera es agua pura, sino salmueras de fluidos subterráneos. Aun así, en el proceso de extracción se corre el riesgo de que las reservas potables de agua subterránea se drenen a las excavaciones geotérmicas.⁸⁶ Nuevamente, el riesgo y daño se pueden reducir con estrategias de monitoreo y minimización del consumo de agua en las distintas etapas del proyecto geotérmico.⁸⁷

⁸³ *Ibid.*, 3.

⁸⁴ *Ibid.*, 2.

⁸⁵ *Ibid.*

⁸⁶ *Ibid.*, 5.

⁸⁷ *Ibid.*

En todo caso, el aprovechamiento geotérmico gasta menos agua que la energía nuclear y la electricidad generada a partir de carbón y gas natural.

La geotermia produce tres tipos de residuos: fluidos, sólidos y calor residual. Idealmente, los fluidos geotérmicos se deben re-inyectar al suelo después de aprovecharse. También se depositan en la superficie terrestre para su evaporación o reutilizarse para usos terapéuticos, como es el caso de la Laguna Azul en Islandia. Los residuos sólidos son pocos y no representan una preocupación ambiental de gran relevancia.⁸⁸ Sin embargo, la acumulación de minerales condensados tras los fluidos provoca la necesidad de darle mantenimiento constante a los pozos; si se descuida la condensación se pueden tapar y quedar inactivos. En general, los residuos de las plantas geotérmicas se pueden minimizar y mitigar con una instalación correcta de equipo, inspección periódica y monitoreo de suelo y agua.⁸⁹ El calor residual se libera a la atmósfera, sin un impacto significativo. La manera óptima de reducir la recarga de calor excesivo a la atmósfera son las aplicaciones híbridas⁹⁰ mencionadas anteriormente, por ejemplo, tener plantas geotérmicas que produzcan electricidad y se combinen con usos directos que aprovechen el calor descargado.

Por último, en el listado de Soltani *et al.* sobre impactos ambientales directos está la contaminación sonora. El ruido más fuerte sucede durante la excavación de los pozos y, dependiendo del sitio de la planta, puede amenazar a la biodiversidad. Una vez en operación, el ruido no es significativo. En suma, una vez ponderados todos los impactos ambientales de la geotermia, los autores consideran que la geotermia tiene una “influencia modesta en el ambiente”.⁹¹

⁸⁸ *Ibid.*

⁸⁹ A. Manzella et al., “Environmental and Social Aspects of Geothermal Energy in Italy,” *Geothermics* 72 (2018): 232–248., citado en Soltani et al., “Environmental, Economic, and Social Impacts of Geothermal Energy Systems,” 5.

⁹⁰ Soltani et al., “Environmental, Economic, and Social Impacts of Geothermal Energy Systems,” 6.

⁹¹ *Ibid.*, 2. Traducción propia del inglés. Cita original: “modest influence on the environment”.

Uno de los retos más grandes de la geotermia es su particularmente baja aceptación social. La razón principal es el poco conocimiento sobre la geotermia entre la población en general, también dentro de sectores científicos e institucionales. Cuando se hace referencia a la tecnología, suelen señalarse inmediatamente sus altos costos y dificultad técnica. De igual manera, existe preocupación acerca de los impactos ambientales como la sismicidad inducida, consumo de agua, efecto negativo en aguas termales. En contraste, la conciencia de los beneficios geotérmicos es casi nula a nivel mundial y, en México, no es anormal que las personas desconozcan que hay generación eléctrica con geotermia en el país, a pesar de ser el séptimo país con más capacidad instalada. Además de la falta de conocimiento sobre la geotermia, la aceptación social se ve afectada por condiciones económicas, políticas y sociales y, a mayor escala, por la comparación con otro tipo de energías renovables. Asegurar la aceptación social de un proyecto geotérmico es importante para su desarrollo porque ésta es necesaria para inversionistas, diseñadores de políticas públicas, autoridades locales y personas habitantes del área.⁹²

F. Ventajas de la geotermia

La energía geotérmica tiene ventajas significativas frente a otras fuentes de energía, incluidas otras energías limpias o renovables. A continuación, se presentan su calidad de energía baja en carbono o renovable –y otros beneficios ambientales–, sus factores de independencia y sus bajos costos de generación. En suma, todas estas ventajas se desprenden de sus cualidades esenciales: ser prácticamente inagotable, baja en carbono y versátil si se combina con usos directos en aprovechamientos cascada.

⁹² *Ibid.*, 1.

La energía geotérmica es una fuente de energía limpia, baja en carbono, en la mayoría de los casos renovable y, con la planeación correcta, sustentable a largo plazo. Estos términos suelen intercambiarse como sinónimos, pero tienen diferencias significativas. “Energías limpias” suele referirse a las que no contaminan.⁹³ Sin embargo, toda generación de electricidad tiene externalidades ambientales y cierto grado de contaminación; entonces una manera más correcta de caracterizar a las energías limpias como las que no contaminan *tanto* –usualmente en comparación a energías fósiles–. Las energías bajas en carbono son las que emiten menos dióxido de carbono a comparación de las energías fósiles.⁹⁴ Las energías renovables se obtienen de fuentes que se regeneran de manera natural, los ejemplos más populares son las energías eólica y solar. Por último, las energías sustentables implican durabilidad que perdure “intergeneracionalmente de una manera que no comprometa en exceso a la sociedad, la economía o el medio ambiente.”⁹⁵ Bajo estas definiciones, hay energías que son limpias y bajas en carbono, pero no renovables, como la nuclear. También energías renovables, pero no necesariamente sustentables, pues depende de cómo se planean y administran; éste podría ser el caso para proyectos de energía eólica o solar. En todo caso, las energías limpias, bajas en carbono o renovables son la base de la transición energética contemporánea para mitigar el cambio climático y otros grandes problemas ambientales. Por su parte, la energía geotérmica es limpia y baja en carbono por sus pocas emisiones y poca contaminación. Es renovable con un buen manejo de los fluidos geotérmicos, en la mayoría de las veces gracias a su reinyección. Cabe recordar que el calor geotérmico no se agota, pero los fluidos con un manejo inadecuado podrían hacerlo. Por esa razón hay profesionales en el área que

⁹³ Kathleen M. Araújo, “A Roadmap for Concepts and Theory of Energy Transitions,” en *Routledge Handbook of Energy Transitions*, ed. Kathleen M. Araújo (Londres: Routledge, 2022), 22.

⁹⁴ *Ibid.*

⁹⁵ *Ibid.*, traducción propia del inglés. Cita original: “*intergenerationally in a manner that does not unduly compromise society, the economy, or the environment.*”

no la consideran renovable.⁹⁶ Finalmente, la energía geotérmica tiene el potencial para ser sustentable a largo plazo. Un aspecto que lo fundamenta es su independencia, que se explica más adelante.

Lo anterior hace a la geotermia una pieza en la lucha contra el cambio climático. Se calcula que con un incremento a 21 GW de capacidad instalada a nivel mundial, la geotermia puede eliminar más de mil millones de toneladas de dióxido de carbono para 2050.⁹⁷ Esto es atractivo a escala global en función al esfuerzo de consolidar la transición energética, no obstante, ¿qué ventajas se presentan a escala local cuando se implementan proyectos geotérmicos? El impulso de la industria geotérmica y consecuentemente el acceso a la energía geotérmica y a sus aplicaciones directas provee con beneficios económicos, medioambientales y sociales que se manifiestan a partir de una menor dependencia a los hidrocarburos, incrementa la calidad de vida de las personas y repercute en que la población obtenga directamente los beneficios de utilizar una fuente de energía sostenible.⁹⁸

Otra ventaja notoria de la geotermia es su uso limitado del territorio. Las plantas geotermoeléctricas se *extienden* hacia abajo, no hacia los lados. Con la referencia de una planta geotérmica con capacidad de 110 MW que en promedio ocupa 1260 metros cuadrados (m²) de superficie, una granja eólica de 25 MW ocupa 12.69 veces más espacio que la geotérmica, una planta solar de 10 MW ocupa 52.38 veces más espacio, una nuclear de 670 MW ocupa 7.9 veces más y una carboeléctrica de 2258 MW ocupa 31.7 veces más espacio.⁹⁹ Nótese que en la comparación la planta nuclear y de carbón tienen una capacidad mucho mayor de capacidad instalada, sin

⁹⁶ Entrevista G, 1 de octubre de 2024.

⁹⁷ R. Bertani y E. Green, “Long-Term Projections of Geothermal-Electric Development in the World,” en *Proceedings of the GeoTHERM Congress*, Offenburg, Alemania, 2009, 5–6. citado en Soltani et al., *Ibid.*, 2.

⁹⁸ Romo Jones y Vélez Andrade, *CeMIEGeo*, 25,26.

⁹⁹ Soltani et al., “Environmental, Economic, and Social Impacts of Geothermal Energy Systems.”, 3.

embargo, es valioso apreciar la disparidad del uso de suelo entre distintas tecnologías. Utilizar poco territorio presenta ventajas en función a menos complejidad a la hora conseguir los terrenos. Asimismo, la mayor demanda energética se concentra en ciudades, por lo que las plantas geotérmicas pueden ser atractivas para su suministro energético puesto que las áreas metropolitanas ya cuentan con espacio reducido.

La energía geotérmica tiene tres factores de independencia importantes: 1) su constancia, 2) su independencia de condiciones climatológicas y 3) su independencia de minerales raros. Los tres están estrechamente relacionados, pero vale la pena revisarlos individualmente. En primer lugar, la generación de electricidad con geotermia no es intermitente. Una vez que se comienza, continúa de manera constante. Esto significa que funciona para proveer la carga base de electricidad que necesita la red para cumplir la demanda mínima. Por lo tanto, siempre se puede inyectar la electricidad a la red y no necesita almacenarse para aprovecharse al máximo, como sí lo requieren energías renovables intermitentes. Sobre la misma línea, las plantas geotermoeléctricas pueden operar flexiblemente para contribuir a la estabilidad de las redes eléctricas, de manera que aseguren que la demanda eléctrica se pueda satisfacer en todo momento.¹⁰⁰ Esta cualidad apoya la integración a la red de renovables intermitentes y afronta uno de los argumentos más comunes para conservar las energías fósiles en la matriz energética, pues estos se utilizan para mantener estable a la red, con un suministro eléctrico constante y sin fluctuaciones causadas por energías renovables como la eólica y solar.

En segundo lugar, la energía geotérmica es independiente de condiciones climatológicas y del estado del tiempo. Puesto a que depende de condiciones geológicas y no climáticas, se puede aprovechar en diversos lugares con climas

¹⁰⁰ International Energy Agency (IEA), *The Future of Geothermal Energy* (París: IEA, 2024), 7.

distintos, por ejemplo, Islandia, Kenia, Indonesia, Nueva Zelanda, Japón, EEUU, Italia y México. A modo de ilustración, un indicador de la independencia a factores climáticos es la tasa de utilización.¹⁰¹ En 2023 las tasas de utilización de la capacidad instalada global fueron de 75%, comparadas con menos de 30% para energía eólica y menos de 15% para solar fotovoltaica –energías intermitentes que sí son dependientes al estado del tiempo–.¹⁰² En última instancia, esta cualidad de la geotermia la hace resiliente ante las consecuencias del cambio climático, que además están pronosticadas a aumentar.

En tercer lugar, otro factor de independencia es que no utiliza minerales raros –o críticos–. Al no necesitar almacenamiento, la energía geotérmica no es dependiente de las nuevas cadenas de suministro de estos minerales utilizados para baterías. En particular, tiene una demanda baja de cobre, cobalto, litio, minerales raros, zinc y aluminio. Sí tiene una demanda alta de níquel y cromo, mas la literatura no la problematiza.¹⁰³ La demanda baja o inexistente de minerales raros no vincula a la geotermia a los obstáculos de la producción y suministro de los mismos. Varios de los yacimientos a nivel mundial se encuentran dentro de ecosistemas críticos que idealmente no deberían de explotarse, en sociedades con conflictos violentos donde la minería se vincula a los conflictos o en países cuyo control mayoritario de los yacimientos puede servir como herramienta de influencia política. En cambio, la geotermia empieza a considerarse como una vía de extracción de estos minerales. En México la nueva Ley de Geotermia contempla la extracción de litio a partir de salmueras geotérmicas. Este uso sigue en sus etapas preliminares, pero es prometedor. El caso se discute en el quinto capítulo. En suma, los factores de independencia la

¹⁰¹ *Ibid.*

¹⁰² *Ibid.*

¹⁰³ International Energy Agency (IEA), *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions* (Paris: IEA, 2021), <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.

hacen una fuente de energía confiable y, como se presenta en el próximo capítulo, contribuyente a la seguridad energética de México.

Respecto a los costos, antes se explicaron los altos costos de la geotermia, sin embargo, éstos se concentran en la etapa de desarrollo del proyecto. La etapa de generación es distinta. De acuerdo con un análisis de la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés¹⁰⁴) los LCOE de la geotermia en su etapa de producción es competitiva con la producción de otras renovables y el costo es incluso más bajo ciertas regiones, como en Sudamérica.¹⁰⁵ Asimismo, los costos también se vinculan a la seguridad energética porque no son volátiles, como sí lo son los de otras energías como las generadas a base de petróleo y gas.¹⁰⁶

De estas ventajas, la SENER reconoce como principales “sus *bajas emisiones de gases efecto invernadero*, 12 veces menos que una planta termoeléctrica convencional, *opera de manera estable* las 24 horas del día, durante 308 días en promedio de los 365 días del año, y sus *costos de producción son competitivos* con centrales termoeléctricas convencionales y centrales nucleares.”¹⁰⁷ A modo de recapitulación, en la siguiente tabla las ventajas expuestas de la geotermia y se añaden características que se discutieron antes en el capítulo.

¹⁰⁴ *International Renewable Energy Agency*

¹⁰⁵ S. K. Sanyal et al., “Comparative Analysis Approaches to Geothermal Resource Risk Mitigation: A Global Survey,” *Knowledge and Service* 24 (2016): 16., citado en Soltani et al., *Ibid.*, 9.

¹⁰⁶ Soltani et al., *Ibid.*, 9.

¹⁰⁷ Comisión Federal de Electricidad (CFE), “México, potencia en geotermia,” *Boletín de la CFE* 2502, acceso 20 de mayo de 2025, <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2502> en SENER, *Balance Nacional de Energía 2023*, 53. Énfasis de la autora.

Tabla 3. Cualidades técnicas positivas de la geotermia como fuente de energía¹⁰⁸	
Usos	Cualidades técnicas
Usos directos	<ul style="list-style-type: none"> ● Versatilidad en usos ● Posible comercialización local de bienes producidos con geotermia ● Posible alivio de demanda eléctrica ● Posibles aplicaciones industriales ● Posible contribución a seguridad alimenticia
Usos directos y energía geotérmica	<ul style="list-style-type: none"> ● Fuente de energía autóctona ● Posibilidad de aprovechamientos cascada ● Limpia ● Baja en carbono ● Renovable ● Potencial a largo plazo de ser sustentable ● Alto potencial nacional teórico
Energía geotérmica	<ul style="list-style-type: none"> ● Semejanzas técnicas con industria de gas y petróleo ● Uso de poco territorio ● Fuente constante de energía ● Sirve de carga base para el sistema nacional de transmisión ● Independencia del clima y estado del tiempo ● Independencia de minerales raros ● Bajos costos de generación
Productos derivados	<ul style="list-style-type: none"> ● Posible comercialización de productos ● Producción de litio

Conclusión

Como se pudo apreciar, la geotermia es una fuente de energía muy versátil en sus aplicaciones, con un gran potencial en México. La literatura ya ha documentado el potencial teórico de desarrollo de energía geotérmica en el país, sin embargo, faltan más evaluaciones sobre el potencial de sus aplicaciones directas. Sobre esta línea, se expusieron los usos directos como categoría, pero en realidad se trata de una gran variedad de aplicaciones y usos. Valdría la pena hacer casos de estudio de cada uno como categoría tecnológica y también evaluar más a fondo el estado de su desarrollo en México. Por lo pronto, queda claro que hay una brecha entre la capacidad instalada

¹⁰⁸ Elaboración propia.

de energía geotérmica en el país –y en el mundo– y su potencial teórico de desarrollo. Sin embargo, ventajas como sus factores de independencia y bajo impacto ambiental a comparación de otras tecnologías podrían servir para fomentar su desarrollo a pesar de sus desventajas y retos inherentes. Pero a la vez, aunque marquen límites claros, los fundamentos técnicos de la geotermia no son el único elemento para entender sus posibilidades de desarrollo. También entra en juego cómo se justifica su desarrollo y qué elementos exógenos pueden limitar su desarrollo. Esto se revisa en el próximo capítulo.

Capítulo II

Justificaciones y barreras: el potencial de la geotermia en la política energética mexicana y las barreras sistémicas de la teoría del *carbon lock-in*

“...es un país mucho más soberano aquel que aprovecha la radiación solar o el viento que cruza el territorio o el vapor en el subsuelo nacional para ofrecer tecnología y energía competitiva de bajo costo abundantes para el beneficio social del país, en lugar de estar atados a una dependencia de los hidrocarburos utilizando plantas con más de 60 años de vida útil que, por una razón de ingeniería, pues van a ser menos eficientes y menos confiables en el despacho eléctrico que las tecnologías de punta de la actualidad.”

- Entrevista I, 29 de noviembre de 2024.

Introducción

Si bien, las posibilidades de desarrollo de la energía geotérmica se delimitan inicialmente por condicionantes geológicos y técnicos, sus posibilidades de expansión se amplían si se asocia a la geotermia con objetivos de construcción institucional y de política energética. Sin embargo, a pesar de su potencial aporte a ciertos objetivos de política energética ligados a su naturaleza técnica, el desarrollo geotérmico en México es limitado. Esto se debe a barreras sistémicas (institucionales, económicas, culturales) exógenas a la geotermia. Entenderlas es crucial para comprender a profundidad las causas del rezago entre el potencial técnico de la geotermia en México y su desarrollo y, por ende, del rezago institucional y de política energética para aprovechar la geotermia en sus distintos usos.

Por ello, este capítulo primero expone la segunda parte del marco teórico del trabajo, seguido del marco metodológico, y finaliza con un análisis de estas herramientas conceptuales aplicadas al contexto mexicano. Para completar el marco teórico, se exponen dos grandes apartados. Primero, se comienza con la presentación de tres grandes principios de política energética que, en general, las políticas

energéticas en el mundo y en México están intentando atender: seguridad energética, soberanía energética y transición energética. En seguida se discute cómo la geotermia se adscribe a estos principios. A *grosso modo* se aprecia que la geotermia puede contribuir al cumplimiento de estos principios. Por consiguiente surge la pregunta: ¿por qué la geotermia no ha despegado en México a pesar de su potencial técnico y beneficios teóricos para la política energética?

La pregunta permite introducir el siguiente apartado del marco teórico. Se explica la teoría del sendero de la dependencia del neoinstitucionalismo histórico para exponer a detalle la subteoría o figura teórica del *carbon lock-in*.¹⁰⁹ El *carbon lock-in* es una idea de ‘dependencia del camino’ que busca explicar las barreras sistémicas del desarrollo y adopción de tecnologías bajas en carbono. Sirve como herramienta analítica para explicar algunas barreras exógenas del desarrollo de la geotermia en México. También dispone de algunas ideas sobre cómo podrían afrontarse las barreras mediante la noción de ‘escapar’ del *carbon lock-in* –*escaping carbon lock-in*–, que introdujo el mismo autor que la propuso, Gregory Unruh.

En conjunto, la exposición de los principios de política energética y del *carbon lock-in* aunada a la exposición técnica de la geotermia en el capítulo anterior concluyen el marco teórico de la tesis. De este modo se establece el marco de referencia para, en los siguientes tres capítulos, explicar los avances y retrocesos de la geotermia en México. Después del marco teórico se explica el marco metodológico de la investigación. Se exponen los métodos de investigación que se emplearon, cuál fue el criterio para escogerlos y qué límites metodológicos tiene la tesis.

¹⁰⁹ Se utiliza el término original en inglés por utilidad y por sencillez a falta de una traducción consensuada en la academia hispanoparlante. Se puede traducir como “efecto candado de carbono” o como “encierro de carbono”, entre otras alternativas.

I. Marco teórico parte II: principios energéticos a los que puede aportar la geotermia y el *carbon lock-in*

A. Grandes principios de política energética

i. Panorama energético global

Un punto de partida para entender de dónde surgen principios de política energética es mirar al panorama energético mundial. Desde finales del siglo XIX, el aumento de aplicaciones eléctricas y, por consiguiente, la generación de electricidad para el suministro eléctrico se ha concebido como una necesidad básica para el desarrollo y crecimiento económico. Los Estados rápidamente incorporaron a sus planes el desarrollo de infraestructura e instituciones para coordinar e implementar la generación y distribución de electricidad. Sin embargo, conforme surgieron distintas tecnologías de producción de electricidad, se ha priorizado o buscado el desarrollo de unas sobre otras con justificaciones técnicas, financieras, ambientales, políticas y demás. Dicho de otro modo, aunque la razón fundacional para construir y desplegar sistemas de generación eléctrica es –y será– el suministro eléctrico, la generación de electricidad y el desarrollo de tecnologías de generación eléctrica no necesariamente están motivados por esa única razón. Por ejemplo, en algunos países, el desarrollo de las energías renovables se fomenta para mitigar el cambio climático. También, tras la invasión rusa a Ucrania en 2022, para fortalecer su seguridad energética, Alemania reactivó plantas carboeléctricas y redujo su dependencia del gas ruso.¹¹⁰ Estas *otras razones de ser* de las fuentes de generación de electricidad se canalizan en los objetivos de política energética en todos sus niveles.

¹¹⁰ H. P. Beck, Z. Hou, Q. Wang, et al., “The German Energy Transition after the Russia-Ukraine War – Challenges and Opportunities,” *Carbon Neutral Systems* 1 (2025): 1.

Paralelamente, en el presente, la vulnerabilidad de los sistemas y mercados energéticos a alteraciones políticas, ambientales y sociales –particularmente evidente en los últimos años tras fenómenos como la pandemia de COVID-19, la invasión rusa a Ucrania y el cambio climático– han desembocado en lo que el Balance Nacional de Energía más reciente declara una crisis energética global.¹¹¹ La crisis se manifiesta en interrupciones de suministros de energéticos, en volatilidad de precios, en esfuerzos de diversificación de matrices energéticas y en el uso de la energía como moneda de negociación política. Además, la crisis se exagera con el hecho de que satisfacer la demanda energética y eléctrica sigue siendo un reto creciente en varias partes del mundo, lo que somete a poblaciones a pobreza energética. Para afrontar estos retos, se pueden implementar estrategias o expresar objetivos guía de política energética para hacer al sistema energético nacional más resiliente ante los desafíos globales y su impacto nacional. En este sentido, tres objetivos clave de la política energética mexicana en los últimos años han sido: seguridad energética, soberanía energética y transición energética. A continuación, se expone en qué consiste cada uno y cómo la geotermia podría aportar a su desarrollo.

ii. Seguridad energética

No existe una definición universal de seguridad energética; pero, rápidamente, se puede decir que implica la capacidad de mantener un suministro energético

¹¹¹ El Balance Nacional de Energía es el reporte anual de la Secretaría de Energía que “expone en forma general y desagregada los principales indicadores de producción, comercio y consumo de la energía de México y sus comparativos en el contexto internacional.” A la fecha el más vigente es el de 2023. Cita de: Secretaría de Energía (SENER), “Balance Nacional de Energía,” *Gobierno de México*, consultado el 10 de julio de 2025, <https://www.gob.mx/sener/es/articulos/balance-nacional-de-energia-296106>. y Secretaría de Energía (SENER), *Balance Nacional de Energía 2023*, Gobierno de México, 6 de febrero de 2025, acceso 20 de mayo de 2025, 22, https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/977268/Balance_Nacional_de_Energ_a_2023.FINAL06.02.2025.1.pdf.

ininterrumpido, comúnmente pensado a nivel país.¹¹² Se consigue cuando un país cuenta con reservas energéticas, equilibrio entre demanda y suministro energético, y comercio energético balanceado.¹¹³ Lograr esto suele equipararse a tener la llamada “independencia energética” de otros Estados o regiones. Por lo tanto, la seguridad energética tiene una dimensión geopolítica importante –el concepto se popularizó con los choques petroleros de los años 1970 y 1980–. Asimismo, en Occidente, el concepto volvió a la discusión pública como resultado de la guerra en Ucrania, la cual reavivó las estrategias de seguridad energética en Europa.

Una manera de medir seguridad energética es con el índice de independencia energética, que se obtiene dividiendo la producción de energía primaria entre el consumo total energético en un mismo periodo.¹¹⁴ Se mide de 0 a 1, donde 1 significa que un país produce toda la energía que consume y más de 1 señala que se produce más del consumo y el excedente de energía se puede almacenar o exportar. La SENER señala que este índice es susceptible a cuatro factores: 1) recursos naturales disponibles, 2) tecnología y eficiencia, 3) políticas energéticas y 4) demanda energética.¹¹⁵ En 2023, el índice de independencia energética de México fue de 0.72, lo que refleja que 72.08% de la demanda se generó nacionalmente y hubo un déficit del 27.92% de energía que se cubrió con importaciones.¹¹⁶

Parte del déficit se aprecia en las importaciones nacionales de gas. Más del 70% del gas consumido en el país se importa de EEUU.¹¹⁷ Esto genera una

¹¹² Tri Ratna Bajracharya, Shree Raj Shakya, y Anzoo Sharma, “Chapter 2 - Dynamics of Energy Security and Its Implications,” en *Handbook of Energy and Environmental Security*, ed. Muhammad Asif (Cambridge, MA: Academic Press, 2022), 13–25.

¹¹³ Bajracharya, Shakya, y Sharma, “Dynamics of Energy Security.”

¹¹⁴ SENER, *Balance Nacional de Energía 2023*, 40.

¹¹⁵ *Ibid.*

¹¹⁶ *Ibid.*, 42.

¹¹⁷ The New York Times, “México teme que EU cierre el grifo del gas natural: dependencia y riesgos,” edición en español, 16 de abril de 2025, <https://www.nytimes.com/es/2025/04/16/espanol/america-latina/mexico-gas-natural-dependencia-eeuu.html>.

dependencia hacia el vecino del norte, lo que vulnera la seguridad energética nacional, dando lugar a afectaciones al suministro eléctrico en situaciones imprevistas, como sucedió en febrero de 2021. A causa de temperaturas anormalmente bajas en Texas, hubo fallas en el suministro de gas natural para México y, en consecuencia, cortes en el servicio eléctrico al no poder alimentar plantas de generación con ciclo combinado.¹¹⁸ Este caso demostró una vulnerabilidad ambiental de la seguridad energética nacional. Es decir, la falla de suministro fue por el estado del tiempo en Texas, no por una acción deliberada. Este tipo de vulnerabilidades se puede atender con sistemas de respaldo energético, sin embargo, también existe el riesgo político de que EEUU decida cortar el suministro de gas a México.

iii. Soberanía energética

Otro objetivo clave de la política energética es la ‘soberanía energética’. Tampoco tiene una definición universal, pero se ha popularizado y empleado el término durante las últimas dos presidencias en México. A veces se utiliza como sinónimo de seguridad energética porque busca la autosuficiencia energética del país, con un énfasis en satisfacer las necesidades energéticas con recursos naturales nacionales. Sin embargo, son conceptos distintos, pero no excluyentes.¹¹⁹ A diferencia de la seguridad, la soberanía energética tiene una dimensión pública importante porque la autosuficiencia tiene que ser garantizada y suministrada por el Estado.¹²⁰ Además, el concepto es una referencia constante al carácter simbólico de la energía para el Estado

¹¹⁸ Araújo, ed., *Routledge Handbook of Energy Transitions*, 167.

¹¹⁹ Isabelle Rousseau, “El sector energético de AMLO: soberanía nacional y modelo de desarrollo endógeno (2018–2024),” *Foro Internacional* 65, no. 3 (2025): 681.

¹²⁰ La preferencia de la generación de electricidad pública sobre la privada dentro de la conceptualización oficial de soberanía energética del gobierno de López Obrador —que tiene continuidad con Sheinbaum— ha sido criticada por suponer que la generación eléctrica estatal sea inherentemente mejor sobre la generación privada, en lugar de evaluar indicadores energéticos particulares como la eficiencia, contaminación o costos que pueden ofrecer tanto el sector público como privado. Entrevista I, 29 de noviembre de 2024.

mexicano moderno, en particular a partir de la expropiación petrolera del 18 de marzo de 1938.¹²¹

La soberanía energética atrajo atención durante el gobierno de López Obrador al ser una de las justificaciones principales de su política de hidrocarburos, que quiso robustecer la producción y refinación nacional de hidrocarburos en aras de aumentar la autosuficiencia.¹²² Visto de otro modo, la política energética de López Obrador utilizó a los hidrocarburos como mecanismo para conseguir soberanía energética. No obstante, independientemente de la fuente de energía que impulse para conseguirla, la noción de soberanía energética “apela a un modelo de desarrollo endógeno”.¹²³ Sobre esta línea, otro mecanismo impulsado por López Obrador para consolidar la soberanía energética fue fortalecer a las empresas productivas del Estado –hoy empresas públicas del Estado–, quienes además son consideradas “palanca[s] de desarrollo nacional.”¹²⁴

Por lo tanto, la soberanía energética también considera el papel del sector energético público dentro del desarrollo económico nacional. Además, el concepto engloba el objetivo de eliminar la pobreza energética. Dentro de la estrategia oficial para recuperar la soberanía en el sector electricidad está la meta de buscar los costos más bajos para los usuarios finales, a quienes se reconoce el acceso a la energía como derecho humano.¹²⁵ La discusión sobre soberanía energética se retoma en el cuarto y quinto capítulo por su impacto y posibilidades para justificar el desarrollo de la geotermia. Sin embargo, más allá de los intereses manifiestos recientes en torno a la

¹²¹ Rousseau, “El sector energético de AMLO.”, 677.

¹²² Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), *Soberanía energética, autosuficiencia y sustentabilidad* (Pronaces ECC – Política Energética, reporte ejecutivo, 11 de abril de 2022), s.p.

¹²³ Rousseau, “El sector energético de AMLO.”, 678.

¹²⁴ Secretaría de Energía (SENER), *Programa Sectorial de Energía 2020-2024* (Ciudad de México: Gobierno de México, 2020), 24. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/562631/PS_SENER_CACEC-DOF_08-07-2020.pdf

¹²⁵ Secretaría de Energía (SENER), *Programa Sectorial de Energía 2020-2024* (Ciudad de México: Gobierno de México, 2020), PDF, s.p.

soberanía energética, proveer energía accesible a la población y asegurar la autosuficiencia son metas de interés nacional.

iv. Transición energética

El tercer principio de política energética que se presenta en esta sección es la transición energética. Para explicarla, primero se define qué es una transición energética en general y después se habla de *la* transición energética actual. También se presenta brevemente cómo ha sido este proceso en México.

Históricamente, las transiciones energéticas ocurren cuando cambian los tipos de fuentes convencionales dominantes de producción de energía. Hoy en día la matriz energética global se compone mayoritariamente de combustibles fósiles –petróleo y gas, en particular–, sin embargo, éstos se convirtieron en la fuente convencional de energía y generación de electricidad apenas en el siglo XX. Antes, desde la revolución industrial, el carbón era la fuente primordial e, incluso anterior a la industrialización, las biomásas como maderas y otros materiales vegetales fueron la principal fuente de energía durante siglos. Hoy en día, la transición a la que comúnmente se refiere como “*la* transición energética” alude a la transición de los combustibles fósiles hacia energías con pocas o nulas emisiones de dióxido de carbono, en otras palabras, hacia la descarbonización del sector energético, idealmente antes del 2050.¹²⁶ Esta meta está estrechamente ligada al objetivo fijado por Naciones Unidas de limitar el cambio climático a no más de 1.5°C –máximo 2°C– a comparación de niveles preindustriales. Sin embargo, es importante notar que la transición a matrices energéticas a base de tecnologías no fósiles no es la única manera de disminuir las emisiones del sector energético. También deben implementarse medidas de eficiencia energética y

¹²⁶ Araújo, “A Roadmap for Concepts and Theory of Energy Transitions.”, 26.

disminución de demanda. En palabras de la SENER: “equiparar a la transición energética sólo con la sustitución tecnológica en la generación de energía eléctrica, es un error frecuente.”¹²⁷

En México la transición energética no ha sido un proceso lineal sino que ha tenido momentos de fomento y retroceso. Desde un punto de vista técnico, el país cuenta con condiciones geográficas altamente favorables para muchos tipos de energías renovables, entre ellas: solar, eólica y geotérmica. Sin embargo, los impulsos de transición han sido principalmente por iniciativa de diplomacia climática en lugar de la Secretaría de Energía o la CFE. Gracias a compromisos climáticos mexicanos en el marco de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)¹²⁸ se han establecido metas y estrategias de mitigación de cambio climático a nivel nacional, como aquellos en la Ley General de Cambio Climático (LGCC) decretada en 2012 y en la Ley de Transición Energética de 2015, hoy derogada por la nueva Ley de Planeación y Transición Energética emitida en marzo de 2025. La LGCC estableció la meta de generar al menos 35% de la energía nacional con fuentes de energías limpias para el 2024. Sin embargo, este objetivo no se logró y en 2022 el porcentaje de generación con renovables en el país fue de 15.4% –datos presentados en el Balance Nacional de Energía más reciente–.¹²⁹ Además, desde 1997

¹²⁷ Secretaría de Energía (SENER), *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2022–2036: Capítulo 3*, 2022, acceso 20 de mayo de 2025, <https://base.energia.gob.mx/prodesen22/Capitulo3.pdf>.

¹²⁸ A escala de la diplomacia climática en el marco de la CMNUCC, desde la fundación de la Convención en 1992, México se ha perfilado como un país proactivo en los esfuerzos de consolidar acuerdos. Resaltó el periodo bajo el liderazgo de la Canciller Patricia Espinosa, cuando México fue sede de la Conferencia de las Partes (COP) 16 en 2010, después de la malograda COP15 en Copenhague el año anterior. El trabajo de la COP16 fue un hito porque ahí se forjaron las bases para el Acuerdo de París de la COP21 en 2015. El Acuerdo de París es el tratado internacional vigente en materia de mitigación climática y dicta el objetivo de limitar el cambio climático a 1.5°C o no más de 2°C sobre niveles preindustriales.

¹²⁹ SENER, *Balance Nacional de Energía 2023*, 36.

el gas natural en ciclo combinado forma parte de la estrategia de transición energética nacional.¹³⁰

El papel del gas natural en la transición se argumenta relevante por ser una alternativa fósil más limpia que otras; es decir, se plantea que su uso reduce las emisiones totales de forma interina en lo que aumenta la capacidad instalada de energías renovables sin comprometer la confiabilidad de la matriz energética. No obstante, la generación de gas requiere infraestructura secundaria –gasoductos, por ejemplo– que puede ser costosa y vulnerable. Además, la inversión que requiere podría fijar el uso del gas a largo plazo por un efecto de *carbon lock-in* –discutido más adelante–, por lo que no se trataría de una energía interina de transición, sino de un nuevo pilar de la matriz energética. Y, como se mencionó previamente, el consumo nacional de gas depende del gas estadounidense, lo que perpetúa una dependencia energética. Por lo pronto, el nuevo Plan de Expansión y Fortalecimiento del Sistema Eléctrico Nacional 2025-2030 del gobierno de Claudia Sheinbaum fijó la meta vigente de aumentar el porcentaje de energías renovables a 32% en el escenario menos ambicioso y a 45% en el más ambicioso, está por verse qué porcentaje se alcanza.¹³¹

v. Geotermia y seguridad energética

Al emanar de un “recurso subterráneo *in situ* con disponibilidad a toda hora”, la energía geotérmica “ofrece un incremento en seguridad energética a comparación de otras tecnologías de generación”: cita el DOE en su publicación *GeoVision* (2019)

¹³⁰ Rousseau, “El sector energético de AMLO.”, 695.

¹³¹ *Aristegui Noticias*, “Conferencia ‘mañanera’ de Claudia Sheinbaum: 06/11/24,” YouTube video, publicado el 6 de noviembre de 2024, consultado el 10 de julio de 2025, https://www.youtube.com/watch?v=Sf8ov_sAuZE&t=299s&ab_channel=AristeguiNoticias.

acerca del potencial estadounidense de la energía geotérmica.¹³² Además, la flexibilidad de la energía geotérmica en los sistemas de transmisión eléctrica también contribuye a la seguridad energética por su confiabilidad. Aunado a esto, al ser una energía local, la geotermia no es vulnerable a dependencias de cadenas de suministro que comprometen la seguridad energética. Un país ejemplar que ha aumentado su capacidad instalada de energía geotérmica con motivos de seguridad energética es Turquía. Entre 2009 y 2019 su número de plantas aumentó de 3 a 9 con una adición de capacidad de 1500 MW.¹³³ En parte, el impulso se debió al esfuerzo turco de reducir su dependencia de importaciones fósiles de Eurasia. Además, el incremento de los usos directos también aporta a la seguridad energética gracias a dos razones: 1) aliviar la demanda de electricidad al reemplazar el uso de electricidad para generar temperaturas con la utilización directa de calor –o sistemas de enfriamiento derivados de él– y 2) su aporte a la diversificación de fuentes de energía.¹³⁴ En suma, la geotermia es una fuente de energía “intrínsecamente segura” en términos de seguridad energética.¹³⁵

vi. Geotermia y soberanía energética

La energía geotérmica contribuye a la soberanía energética por las mismas razones que contribuye a la seguridad energética. No obstante, tiene algunos elementos específicos que la podrían posicionar narrativamente como un mecanismo atractivo para la soberanía energética en particular. Es autóctona del territorio y mares

¹³² U.S. Department of Energy, *GeoVision*, 2. Traducción propia del inglés. Citas originales: “*subsurface resource with around-the-clock availability*” y “*offers increased energy security compared to other generation technologies.*”

¹³³ *Piensa Geotermia*. “Desarrollo de la energía geotérmica en Turquía: Informe científico de la UNESCO, Füsün Servin Tut Haklıdır.” Consultado el 18 de agosto de 2025. <https://www.piensageotermia.com/desarrollo-de-la-energia-geotermica-en-turquia-informe-cientifico-d-e-la-unesco-fusun-servin-tut-haklidir/>.

¹³⁴ *Ibid.*, 5.

¹³⁵ *Ibid.*, 34.

nacionales, es constante, no necesita almacenamiento, tiene mucho potencial y, como se expone en los próximos capítulos, las bases de su desarrollo nacional son indisociables de CFE y Pemex. Por consiguiente, es una fuente de energía prometedora para contribuir a la soberanía energética nacional. Asimismo, a menor escala, sus usos directos y el aumento de generación de energía geotérmica tienen el potencial de combatir la pobreza energética en tanto dan acceso comunitario a una fuente de energía y satisfacen la demanda eléctrica. También, las aplicaciones industriales de usos directos podrían aportar al desarrollo económico del país.

De igual manera, si la estrategia de soberanía energética priorizara la conservación del medio ambiente y su efecto positivo en la salud pública, el desarrollo geotérmico también podría enmarcarse en la soberanía dado que es una energía limpia.

vii. Geotermia y transición energética

La geotermia (en particular la energía geotérmica) aporta a la transición energética por ser limpia, baja en carbono y renovable –de ahora en adelante se utiliza “baja en carbono” y “limpia” de manera intercambiable para describirla, además de “renovable”–. Asimismo, por ser constante es una renovable atractiva para la transmisión de electricidad y a su vez puede apoyar el desarrollo de renovables intermitentes como apoyo cuando éstas no generan electricidad. La Ley del Sector Eléctrico (2025) cataloga a la energía geotérmica como una energía limpia, lo que la incluye –en teoría– en la estrategia nacional de transición energética.¹³⁶ En los próximos capítulos se analiza cuándo se ha impulsado la geotermia con este propósito explícito en mente. Además, sus usos directos pueden reemplazar consumo de

¹³⁶ México, *Ley del Sector Eléctrico*, Diario Oficial de la Federación, 18 de marzo de 2025, 3.

electricidad para ciertos usos que, en caso de ser producida con fuentes fósiles, también implica una disminución de emisiones.

A su vez, las semejanzas de la industria geotérmica con la del gas y petróleo abren una oportunidad a la segunda para descarbonizar parte de sus actividades y mantener rentabilidad. Incluso, ofrece un camino alternativo a especialistas y profesionales que podrían saltar a la industria geotérmica. Además, como se verá en el último capítulo, el crecimiento mundial de la industria geotérmica está aumentando la demanda de profesionales en el área.

En suma, el desarrollo de la energía geotérmica puede aportar a la seguridad, soberanía y transición energética. Estas tres metas no son las únicas a las que puede aportar sin embargo son útiles para incorporar otros objetivos, como la justicia energética, por ejemplo. El objetivo de la exposición fue demostrar por qué y cómo, en teoría, la geotermia puede aportar a los objetivos de la política energética nacional. Entender estas razones ayuda a comprender cómo a lo largo de la historia de la geotermia se ha justificado su desarrollo y cómo podría justificarse en el futuro. A modo de recapitulación, la siguiente tabla –basada en la tabla de cualidades positivas expuesta en el primer capítulo– señala qué aspectos técnicos pueden aportar a qué objetivos de política energética.

Tabla 4. Cualidades técnicas positivas de la geotermia como fuente de energía y su aporte a objetivos de política energética¹³⁷				
Usos	Cualidades técnicas	Objetivos a los que puede aportar		
		Seguridad energética	Soberanía energética	Transición energética
Usos directos	<ul style="list-style-type: none"> ● Versatilidad en usos ● Posible comercialización local de bienes producidos con geotermia ● Posible alivio de demanda eléctrica ● Posibles aplicaciones industriales ● Posible contribución a seguridad alimentaria 	x	x x	x x
Energía geotérmica	<ul style="list-style-type: none"> ● Semejanzas técnicas con industria de gas y petróleo ● Uso de poco territorio ● Fuente constante de energía ● Sirve de carga base para el sistema nacional de transmisión ● Independencia del clima y estado del tiempo ● Independencia de minerales raros ● Bajos costos de generación 	x x x x x x x	x x x x x x x	x x x x x x x
Usos directos y energía geotérmica	<ul style="list-style-type: none"> ● Fuente de energía autóctona ● Posibilidad de aprovechamientos cascada ● Limpia ● Baja en carbono ● Renovable ● Potencial a largo plazo de ser sustentable ● Alto potencial nacional teórico 	x x x x	x x x x x x x	x x x x x x x
Productos derivados	<ul style="list-style-type: none"> ● Posible comercialización de productos ● Producción de litio 	x	x x	x

La tabla ilustra los beneficios, versatilidad y utilidad de la geotermia como fuente de energía. Estos aspectos son una herramienta para justificar su desarrollo en teoría. Si bien tiene retos y desventajas inherentes, en el contexto mexicano rara vez son suficientes para explicar la brecha entre el nivel de desarrollo geotérmico en el país y su potencial, sobre todo frente a los beneficios que una evaluación completa de la energía podría demostrar. En ocasiones las tecnologías también se enfrentan a

¹³⁷ Elaboración propia.

barreras exógenas y sistémicas que las limitan. La geotermia no es la excepción. Así como se reconoció a la geotermia como una tecnología que, en teoría, puede aportar a principios amplios de política energética, también es importante reconocer dónde se sitúa en el escenario histórico e institucional del sector energético mexicano.

B. Sendero de la dependencia y carbon lock-in

Para enmarcar a la geotermia en el escenario anterior, esta sección comienza con una breve exposición sobre el predominio de los hidrocarburos dentro del sector energético nacional. Como se apreciará, no se puede entender al sector energético y eléctrico mexicano sin reconocer el papel esencial que el petróleo –y en menor medida el gas– han tenido en la construcción económica, social e institucional de México posrevolucionario. La estrecha relación entre hidrocarburos y desarrollo nacional ha forjado la existencia del fenómeno *carbon lock-in*, un tipo de sendero de la dependencia, en el sector energético nacional. El *carbon lock-in* afecta directamente las posibilidades de desarrollo de fuentes de energía distintas a los hidrocarburos, entre ellas: la geotermia. Por consiguiente, después de revisar el papel de los hidrocarburos dentro del sector energético, se expone en qué consiste la figura del sendero de la dependencia de acuerdo con el neoinstitucionalismo histórico para, finalmente, dedicar el resto del marco teórico al *carbon lock-in* y terminar el capítulo con el marco metodológico de la investigación.

i. La importancia de los hidrocarburos en el sector energético mexicano¹³⁸

La consolidación del régimen mexicano post revolucionario es indisociable de la industria petrolera nacional. En buena medida, el vínculo surgió debido a que el

¹³⁸ Véase: Ángel de la Vega Navarro, *La evolución del componente petrolero en el desarrollo y la transición de México* (México: UNAM, 1999).

desenlace revolucionario fue acompañado de una gran prosperidad petrolera. A inicios de la década de 1920, México era el segundo exportador de petróleo a nivel mundial, sólo después de EEUU. Sin embargo, desde el porfiriato, la actividad petrolera estaba dominada por intereses estadounidenses e ingleses.¹³⁹ Esto cambió *de iure* con los artículos 25, 27 y 28 de la Constitución de 1917 y *de facto* en 1938 con la expropiación petrolera encabezada por el presidente Lázaro Cárdenas. A partir de entonces, el Estado mexicano administró y organizó la industria petrolera. Petróleos Mexicanos (Pemex) se creó en 1938 y –tras ajustes y reacomodos iniciales– se concretó como monopolio del Estado en 1940.¹⁴⁰ La centralización de todas las propiedades y funciones de la industria petrolera en Pemex hicieron que, hasta la Reforma Energética de 2013, la empresa e industria petrolera fueran indisociables.¹⁴¹

Para mediados del siglo XX, Pemex se había convertido en un pilar de la industrialización del país. Por lo tanto, forjó un impacto considerable sobre la estructura económica de México.¹⁴² La producción del crudo se orientó hacia el mercado interno para el abastecimiento de energía a bajos costos. Esto, aunado a los fuertes vínculos políticos entre la empresa y el gobierno resultó en que la historia del desarrollo de la industria petrolera acompañara e influenciara la creación del nuevo régimen, su consolidación institucional, y la vida económica y social del país a lo largo del siglo XX e inicios del XXI.¹⁴³ El enlace entre industria petrolera y régimen posrevolucionario se volvió tan estrecho que Pemex asumió un papel de estabilizador del régimen y la cuestión del petróleo se tornó en “un tema emocional que incluía la

¹³⁹ Isabelle Rousseau, *Tribulaciones de dos empresas petroleras estatales, 1900-2014: Trayectorias comparadas de Pemex y PdVSA* (Ciudad de México: El Colegio de México, 2017), 54.

¹⁴⁰ *Ibid.*, 151.

¹⁴¹ *Ibid.*, 149.

¹⁴² *Ibid.*

¹⁴³ Isabelle Rousseau, “Introducción,” en *La política energética y petrolera vista desde “Foro Internacional”*, ed. Isabelle Rousseau (Ciudad de México: El Colegio de México, Centro de Estudios Internacionales, 2017), 11.

raza y la nacionalidad” para los mexicanos.¹⁴⁴ Esto llevó a priorizar funciones políticas, fiscales y sociales sobre las económicas y comerciales a tal grado que para finales de los 1960s e inicios de los 1970s Pemex se convirtió “en una empresa deficitaria cuyo funcionamiento dependía de un endeudamiento cada vez más elevado”.¹⁴⁵ Aunadas deficiencias en planeación y exploración, la situación se agravó tanto que para inicios de 1970, Pemex ya era importador neto de crudo y productos petrolíferos.¹⁴⁶

No obstante, la situación cambió categóricamente durante el resto de la década. En medio de los choques petroleros de 1973 y 1979, se descubrieron grandes yacimientos de crudo en Chiapas, Tabasco y Campeche.¹⁴⁷ Los altos precios internacionales más la buena calidad del crudo descubierto multiplicó la renta petrolera a tal grado que México se convirtió en exportador neto de crudo y gas natural y su economía se “petrolizó”. En la siguiente tabla se aprecia el crecimiento de la renta petrolera en proporción del PIB entre 1972 y 1983.

¹⁴⁴ Alan Knight, “The Politics of Expropriation,” en *The Mexican Petroleum Industry in the Twentieth Century*, eds. Jonathan C. Brown y Alan Knight (Austin: University of Texas Press, 1986), 91. en Rousseau, “Introducción,” 13.

¹⁴⁵ Rousseau, “Introducción,” 15.

¹⁴⁶ *Ibid.*

¹⁴⁷ *Ibid.*

<i>Tabla 5. Renta petrolera como proporción del PIB, 1972-1983¹⁴⁸</i>	
<i>Año</i>	<i>Renta petrolera como proporción al PIB</i>
1972	0.31%
1973	0.47%
1974	2.6%
1975	2.5%
1976	3%
1977	3.3%
1978	3.6%
1979	8.7%
1980	9.6%
1981	7.4%
1982	7.5%
1983	12%

El episodio de abundancia petrolera de los 1970s reavivó la importancia nacionalista del petróleo para el Estado mexicano moderno y recalcó una fuerte dependencia entre el sector petrolero y el sector energético. En el presente, el petróleo se sostiene como la mayor fuente de producción energética doméstica del país; representa 62.3% de la producción nacional.¹⁴⁹

Por su lado, el gas natural también desarrolló un papel significativo en la matriz energética nacional, particularmente para la generación eléctrica. Desde

¹⁴⁸ Elaboración propia con datos de *Oil rents as a share of GDP*, Our World in Data, consultado el 19 de septiembre de 2025, <https://ourworldindata.org/grapher/oil-rents-as-a-share-of-gdp?tab=line&country=~MEX>.

¹⁴⁹ International Energy Agency (IEA), “Mexico — Energy mix,” IEA, consultado el 3 de octubre de 2025, <https://www.iea.org/countries/Mexico/energy-mix>. La producción energética nacional es la suma de todos los combustibles fósiles producidos, independientemente de si se queman para producción eléctrica o son usados como combustible, y la energía eléctrica producida por paneles solares, turbinas eólicas, quema de residuos municipales o biocombustibles, plantas hidroeléctricas, nucleares y geotérmicas.

mediados de la década de 1990 México comenzó a generar electricidad con plantas de ciclo combinado de gas natural.¹⁵⁰ En 2002, superó al petróleo como el combustible principal para generación eléctrica nacional.¹⁵¹ Con el paso de los años, se ha enmarcado como parte de la estrategia de descarbonización del sector energético a causa de su menor intensidad de emisiones de carbono respecto a otros hidrocarburos. Sobre esta línea, es común que se hable del gas como un combustible de transición –dentro de la transición energética–. Sin embargo, críticos de esta narrativa señalan que las inversiones que involucran mantener o expandir el uso de gas en el país alargarán su uso sin incentivos contundentes para descarbonizar el sector energético y eléctrico. Esta crítica se conecta con el *carbon lock-in*, que se desarrolla en las siguientes páginas.

Tabla 6. Fuentes de generación eléctrica en México, 2024.¹⁵²

Fuente de generación eléctrica	GWh	Porcentaje
Carbón	29874	7.63%
Petróleo	28933	7.39%
Gas natural	242296	61.86%
Biocombustibles	1094	0.28%
Residuos	240	0.06%
Nuclear	12266	3.13%
Hidroeléctrica	24285	6.20%
Solar fotovoltaica	24274	6.20%
Eólica	19952	5.09%
Geotermia	3696	0.94%
Otras fuentes	4745	1.21%

¹⁵⁰ Rousseau, “Introducción,” 19.

¹⁵¹ IEA, “Mexico — Energy mix.”

¹⁵² Elaboración propia con datos de la IEA *Ibid.*. Los datos de la figura son idénticos a los de la *Figura 1. Matriz eléctrica nacional (%), 2024 expuesta en la introducción.*

En síntesis, el petróleo y el gas han dominado los sectores energéticos y eléctricos de México, y el primero, en especial, tuvo un papel fundamental en las décadas posteriores a la revolución y hasta cierto punto acompañó la construcción institucional del país. Por su parte, el siglo XXI ha presenciado una creciente importancia del gas –la predominancia de los hidrocarburos en el sector energético nacional ha sido constante–. En la siguiente sección se explora qué consecuencias puede tener lo anterior para el desarrollo de tecnologías energéticas alternativas, como la geotermia, según la teoría del sendero de la dependencia.

ii. Institucionalismo histórico y el sendero de la dependencia

Existen varias tradiciones de análisis institucional en la ciencia política. A diferencia de generaciones anteriores, la academia contemporánea ya no se pregunta *si* las instituciones importan para influenciar la política, sino se pregunta *cómo* y *cuándo* las instituciones moldean procesos políticos.¹⁵³ A grandes rasgos, desde la década de 1990 se han consolidado tres variantes de institucionalismo: elección racional, sociológico e histórico; también conocidas como tipos de neoinstitucionalismo.¹⁵⁴ Los tres tipos sitúan su estudio dentro de dos dimensiones de análisis de las ciencias sociales: 1) el *continuum* entre lo micro y macro y 2) el *continuum* entre lo material y

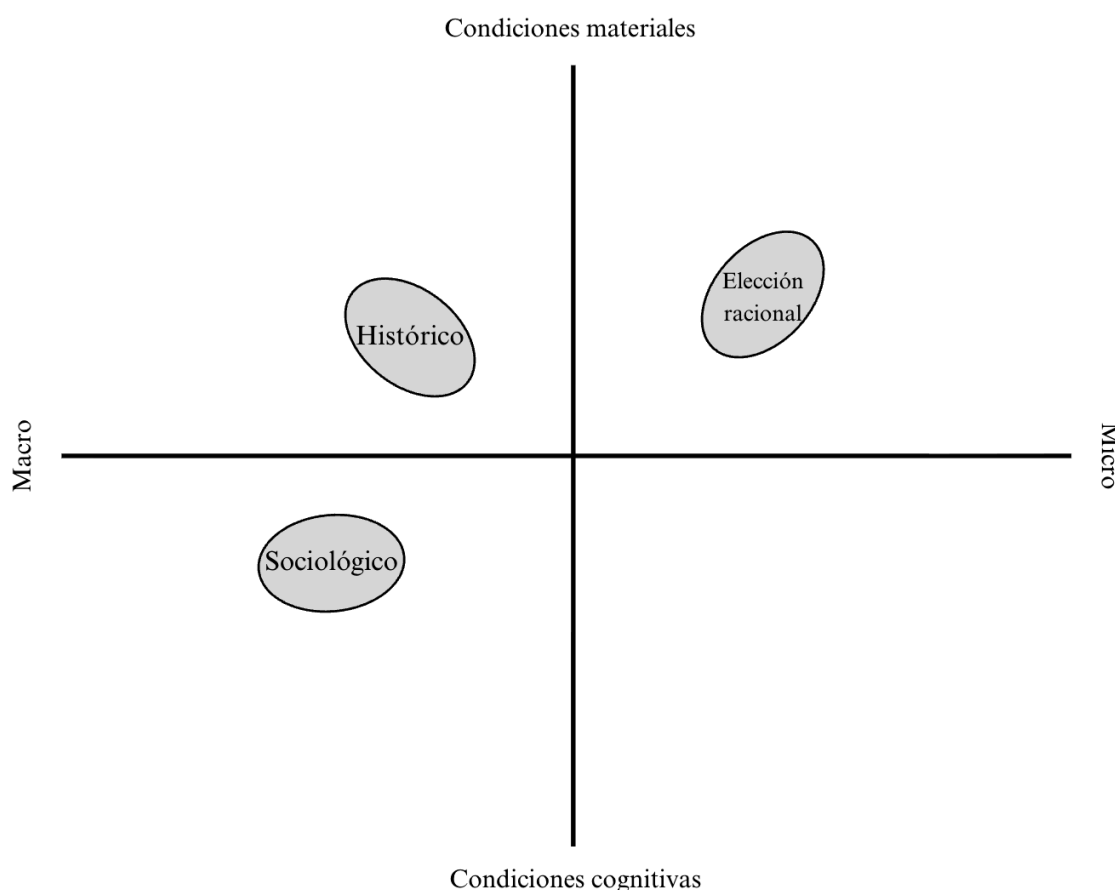
¹⁵³ Orfeo Fioretos, Tulia G. Falleti y Adam Sheingate, “Historical Institutionalism in Political Science,” en *The Oxford Handbook of Historical Institutionalism*, eds. Orfeo Fioretos, Tulia G. Falleti y Adam Sheingate (Oxford: Oxford University Press, 2016; ed. en línea, Oxford Academic, 2 de mayo de 2016), 3.

Asimismo, parte de los orígenes teóricos del neoinstitucionalismo se desprende del *behaviorismo* de las décadas de los años 1950 y 1960. Los institucionalistas criticaron que se utilizara el comportamiento observable como base suficiente para explicar fenómenos. En contraste, sostuvieron que “el comportamiento ocurre en un contexto de instituciones y sólo puede entenderse así.” Cita traducida del inglés. Cita original: “*For behaviour occurs in the context of institutions and can only be so understood.*” Ellen M. Immergut, “The Theoretical Core of the New Institutionalism,” *Politics & Society* 26, no. 1 (March 1998): 6.

¹⁵⁴ Fioretos, Falleti y Sheingate, *The Oxford Handbook of Historical Institutionalism.*, 6.

lo cognitivo.¹⁵⁵ La siguiente figura ofrece una representación gráfica de la posición de cada uno, según el *Oxford Handbook of Historical Institutionalism* (2016).

Figura 5. Los tres neoinstitucionalismos¹⁵⁶



En particular, el neoinstitucionalismo histórico analiza contextos a nivel macro y formula hipótesis sobre los efectos combinados de instituciones y procesos, en lugar de examinar una institución o proceso por separado.¹⁵⁷ En otras palabras, analiza configuraciones organizacionales e institucionales en vez de contextos particulares en

¹⁵⁵ *Ibid.*

¹⁵⁶ Adaptación y traducción propia del inglés de la figura “FIGURE 1.1 The New Institutionalisms (c.1995)” en *Ibid.*

¹⁵⁷ Theda Skocpol y Paul Pierson, “Historical Institutionalism in Contemporary Political Science,” en *Political Science: State of the Discipline*, ed. Ira Katznelson y Helen V. Milner (Nueva York: W. W. Norton, 2002), 696.

aislamiento.¹⁵⁸ Para llevar a cabo este análisis, el neo institucionalismo histórico rastrea secuencias de resultados a lo largo del tiempo y muestra cómo resultados anteriores cambian los parámetros de desarrollos subsecuentes.¹⁵⁹

El neoinstitucionalismo histórico tiene dos planteamientos teóricos que le sirven de herramientas analíticas: la idea de coyuntura crítica y el sendero de la dependencia. Las coyunturas críticas son momentos en un periodo relativamente corto de tiempo a los que se les suele atribuir causalidad histórica distante de tal magnitud que marcan el inicio de un sendero de dependencia.¹⁶⁰ Ahora bien, el concepto de sendero de la dependencia se refiere a las dinámicas de auto reforzamiento o de secuencias reactivas en un sistema político que promueven la recurrencia de un patrón particular en el futuro.¹⁶¹ Visto de otro modo, al fijar y promover patrones o alternativas políticas específicas se excluyen otras alternativas que en algún punto fueron plausibles. Bajo esta línea, conforme se mantiene el sendero de la dependencia y se reiteran sus procesos de retroalimentación, estas alternativas secundarias pueden llegar a “perderse de manera irrecuperable” y, por ende, se remueven opciones de las posibilidades políticas subsecuentes.¹⁶²

El sendero de la dependencia ha servido para analizar y aproximarse a temas de transiciones sustentables y transiciones energéticas. Suele emplearse para explicar la estabilidad de sistemas socio-técnicos que favorecen la prevalencia de tecnologías

¹⁵⁸ *Ibid.*, 693.

¹⁵⁹ Theda Skocpol, “Why I Am an Historical Institutionalism,” *Polity* 28, no. 1 (otoño de 1995): 103–106, publicado por The University of Chicago Press en nombre de la Northeastern Political Science Association, 106.

¹⁶⁰ Para conocer con más detalle las coyunturas críticas véase: Capoccia, Giovanni. “Critical Junctures.” En *The Oxford Handbook of Historical Institutionalism*, editado por Orfeo Fioretos, Tulia G. Falletti y Adam Sheingate. Oxford: Oxford University Press, 2016. Ed. en línea, Oxford Academic, 2 de mayo de 2016.

¹⁶¹ Skocpol y Pierson, “Historical Institutionalism in Contemporary Political Science,” 699 y James Mahoney, Khairunnisa Mohamedali y Christoph Nguyen, “Causality and Time in Historical Institutionalism,” en *The Oxford Handbook of Historical Institutionalism*, eds. Orfeo Fioretos, Tulia G. Falletti y Adam Sheingate (Oxford: Oxford University Press, 2016; ed. en línea, Oxford Academic, 2 de mayo de 2016), 72.

¹⁶² Skocpol y Pierson, “Historical Institutionalism in Contemporary Political Science,” 700. Traducción propia del inglés. Cita original: “*irretrievably lost*”.

que no aportan al modelo de desarrollo sustentable o bajo en carbono que se busca alcanzar.¹⁶³ El *carbon lock-in* es una herramienta conceptual común para atender este tipo de análisis. A continuación, se desarrolla con mayor profundidad de qué trata.

iii. Carbon lock-in

Propuesta inicialmente por Gregory C. Unruh, la figura teórica del *carbon lock-in* es un caso especial de sendero de la dependencia que da una base conceptual para entender las barreras a gran escala de la difusión de tecnologías descarbonizadoras, incluso cuando éstas tienen beneficios o cualidades superiores a tecnologías con altas emisiones de carbono.¹⁶⁴ Las barreras se imponen por vínculos y retroalimentaciones entre sistemas técnicos, institucionales y conductuales que, en consecuencia, favorecen al *status quo* de complejos técnico-institucionales (CTI) altos en emisiones de GEI –por ello la noción del “encierro” (*lock-in*) de carbono–.

En México, hay *carbon lock-in* en el sector energético nacional, aunque, a grandes rasgos se puede argumentar que varios sectores mexicanos tienen *carbon lock-in*, sin embargo, para determinarlo falta un análisis que escapa del alcance de esta tesis. Respecto a la energía, como se expuso anteriormente, la importancia histórica de los combustibles fósiles –en especial del petróleo– para el desarrollo económico y político nacional, aunada a la prevalencia de combustibles fósiles en la matriz

¹⁶³ Walker, William. “Entrapment in Large Technology Systems: Institutional Commitment and Power Relations.” *Research Policy* 29, núms. 7–8 (2000): 833–846.; Berkhout, Frans. “Viewpoint: Technological Regimes, Path Dependence and the Environment.” *Global Environmental Change* 12, no. 1 (2002): 1–4.; Geels, Frank W. “From Sectoral Systems of Innovation to Socio-Technical Systems: Insights about Dynamics and Change from Sociology and Institutional Theory.” *Research Policy* 33, núms. 6–7 (2004): 897–920.). En Eeva-Lotta Apajalahti y Gregor Kungl, “Path Dependence and Path Break-Out in the Electricity Sector,” *Environmental Innovation and Societal Transitions* 43 (2022): 220.

¹⁶⁴ Gregory C. Unruh, “Understanding Carbon Lock-In,” *Energy Policy* 28, no. 12 (2000): 818. y Karen C. Seto, Steven J. Davis, Ronald B. Mitchell, Eleanor C. Stokes, Gregory Unruh, y Diana Ürge-Vorsatz, “Carbon Lock-In: Types, Causes, and Policy Implications,” *Annual Review of Environment and Resources* 41 (2016): 427.

energética y al rezago de las energías renovables a pesar de su potencial técnico en el territorio nacional indican el *carbon lock-in* en el sector energético.¹⁶⁵ Asimismo, conforme se expone con más detalle en qué consiste la teoría del *carbon lock-in* se pueden asociar sus rasgos a características del sector energético nacional. Sin embargo, dado que no es objetivo de esta tesis demostrar de manera exhaustiva la existencia de *carbon lock-in* en el sector energético mexicano, se asume como supuesto teórico que se encuentra presente. No obstante, más adelante sí se analizan componentes del *carbon lock-in* en la historia de la geotermia mexicana y por qué distintos tipos de *lock-ins* son útiles para comprenderla. En virtud de lo anterior, en lo que resta de la investigación cuando se menciona el *carbon lock-in* mexicano se refiere a el *carbon lock-in* en el sector energético mexicano.

Para elaborar en qué consiste el *carbon lock-in*, a continuación se presentan los siguientes dos apartados. En primer lugar, se exponen los componentes y consecuencias del *carbon lock-in*. Para ello, primero se comparten algunas definiciones clave de la subteoría. Éstas permiten discutir su alcance y, más adelante, familiarizarla con la historia del desarrollo de la geotermia. En concreto se define 1) qué es un CTI, 2) en qué consiste la figura del *lock-in* dentro de la teoría de dependencia del camino y 3) la tipología de *carbon lock-in* propuesta por Seto *et al.* en 2016.¹⁶⁶ Al presentar estos tipos de *lock-ins* comienzan a revelarse sus

¹⁶⁵ Carecen estudios especializados que analicen el *carbon lock-in* en México o en distintos sectores nacionales. Hasta el momento, la autora sólo encontró un texto que analiza el *carbon lock-in* en el sector energético nacional. Sin embargo, se trata de un manuscrito de artículo por publicarse que todavía no es revisado por pares, titulado *Carbon Lock-In and Contradictions – Teaching Mexico’s Energy Transition*. Véase: Muñoz Meléndez, Gabriela, Miguel Ángel Gutiérrez Ortiz, Patricia Romero Lankao, José Carlos Fernández Pérez, y Daniel Lázaro Toledo. “Carbon Lock-In and Contradictions – Teaching Mexico’s Energy Transition.” *Preprints*, 30 de junio de 2021. Dado que aún no se revisa por pares, la investigación se limita a reconocerlo pero no se refiere a él más adelante.

¹⁶⁶ En 2016 se publicó el artículo *Carbon Lock-In: Types, Causes, and Policy Implications* escrito por cinco académicos de distintas instituciones, incluido Gregory Unruh, el proponente inicial del *carbon lock-in*. El artículo hace una revisión de literatura el EC y ofrece la tipología expuesta en esta investigación. En específico, los autores son: Karen C. Seto, del *Yale School of Forestry and Environmental Studies* de Yale, Steven J. Davis del *Department of Earth System Science* de UC Irvine, Ronald B. Mitchell del *Department of Political Science and Program in Environmental Studies* de la Universidad de Oregon, Gregory Unruh del *New Century College* de la Universidad George Mason y

consecuencias, sin embargo, a modo de aclaración, después se recapitulan los efectos del *carbon lock-in*. Después, se expone brevemente otro tipo de *lock-in* que afecta a la geotermia: el *lock-in* dentro del desarrollo de las energías renovables que favorece a unas sobre otras.

Las consecuencias del *carbon lock-in* son interesantes porque, si bien perpetúan CTIs altos en carbono, también indican condiciones deseables para garantizar o expandir el desarrollo de una tecnología. En otras palabras, permiten introducir la noción de “*lock-ins* positivos”. Por lo tanto, en segundo lugar, con el objetivo de más adelante pensar en oportunidades de fomento de la geotermia, se discuten dos cosas: 1) el *lock-in* positivo y 2) cómo escapar del *carbon lock-in*. Conforme se presentan los elementos mencionados se indica en qué capítulo subsecuente se profundiza en ellos en conjugación con la historia de la geotermia en México. Por último, se discute brevemente el alcance de la teoría del *carbon lock-in*, tanto para la historia de la geotermia nacional así como para analizar transiciones sustentables.

Para entender de manera más completa a grandes sistemas tecnológicos –como la generación de electricidad, por ejemplo– surge la idea del complejo técnico-institucional (CTI).¹⁶⁷ En lugar de conceptualizar a los sistemas tecnológicos como un conjunto de artefactos técnicos aislados, la noción del CTI los caracteriza como “sistemas complejos de tecnologías integradas en un contexto social poderoso y condicionante de instituciones públicas y privadas”.¹⁶⁸ Los CTI se desarrollan mediante un proceso de coevolución y dependencia del camino que involucra

Diana Ürge-Vorsatz del *Center for Climate Change and Sustainable Energy Policy* de la Universidad Central Europea. Seto et al., “Carbon Lock-In,” 425.

¹⁶⁷ Unruh, “Understanding Carbon Lock-In,” 818.

¹⁶⁸ *Ibid.* Traducción propia del inglés. Cita original: “...*complex systems of technologies embedded in a powerful conditioning social context of public and private institutions.*”

retroalimentaciones positivas entre infraestructuras tecnológicas y las organizaciones e instituciones que las crean, difunden y emplean.¹⁶⁹ Por ejemplo: las instituciones del CTI de la industrialización han favorecido a los combustibles fósiles en tal grado que ahora éstos se conciben medulares del mismo CTI porque las tecnologías de explotación de combustibles fósiles han garantizado la energía barata y confiable que la industrialización necesita.¹⁷⁰ En otras palabras, gracias a la retroalimentación positiva entre combustibles fósiles e industrialización los combustibles fósiles son claves para las instituciones que buscan industrialización. Puede haber otras alternativas tecnológicas que sean claves, sin embargo, existe un *carbon lock-in* dentro del CTI ejemplificado. Para entender mejor este ejemplo y la teoría del *carbon lock-in* en general, a continuación se presenta en qué consiste la idea del *lock-in*.

Dentro de la teoría de dependencia del camino, la figura del *lock in* describe cuando un sistema o proceso se vuelve resistente al cambio y perpetúa la trayectoria de ese momento.¹⁷¹ La literatura ha identificado muchos tipos de *lock-ins* que indican condiciones materiales o no materiales y destaca seis grupos específicos: los tecnológicos, institucionales, sociales, económicos, legales y psicológicos.¹⁷² Al retener y prolongar una trayectoria los *lock-ins* tienen externalidades. Éstas pueden ser positivas o negativas. Sólo cuando las externalidades incluyen emisiones de carbono,

¹⁶⁹ *Ibid.*

¹⁷⁰ Karen C. Seto et al., “Carbon Lock-In: Types, Causes, and Policy Implications,” *Annual Review of Environment and Resources* 41 (2016): 426.

¹⁷¹ Avri Eitan y Marko P. Hekkert, “Locked in Transition? Towards a Conceptualization of Path-Dependence Lock-Ins in the Renewable Energy Landscape,” *Energy Research & Social Science* 106 (2023): 3.

¹⁷² Loet Leydesdorff y Peter Van den Besselaar, “Competing Technologies: Lock-ins and Lock-outs,” *AIP Conference Proceedings* 437, no. 1 (1998): 309–323., Jörg Sydow, Georg Schreyögg y Jochen Koch, “Organizational Path Dependence: Opening the Black Box,” *Academy of Management Review* 34, no. 4 (2009): 689–709., Jennifer Ross y Barry M. Staw, “Organizational Escalation and Exit: Lessons from the Shoreham Nuclear Power Plant,” *Academy of Management Journal* 36, no. 4 (1993): 701–732., Geoffrey A. Wilson, “Community Resilience: Path Dependency, Lock-in Effects and Transitional Ruptures,” *Journal of Environmental Planning and Management* 57, no. 1 (2014): 1–26., Robert C. Ellickson, “Legal Sources of Residential Lock-ins: Why French Households Move Half as Often as U.S. Households,” *University of Illinois Law Review* (2012): 373., Barry M. Staw, “Knee-deep in the Big Muddy: A Study of Escalating Commitment to a Chosen Course of Action,” *Organizational Behavior and Human Performance* 16, no. 1 (June 1, 1976): 27–44. en *Ibid.*

se les denomina como tipos de *carbon lock-in*.¹⁷³ En concreto, la tipología de *carbon lock-in* de Seto *et al.* señala tres tipos de *carbon lock-in*: el tecnológico, institucional y conductual, un tipo de *lock-in* psicológico. Como se mencionó, estos pueden existir por sí mismos y sólo califican como *carbon lock-in* sus externalidades incluyen emisiones. Esta posibilidad de doble naturaleza –ser *carbon lock-in* o sólo un tipo de *lock-in*– resulta muy útil para identificar las barreras del desarrollo de la geotermia en México. Por ejemplo, en el siguiente capítulo se discute el caso del doble *lock-in* –tecnológico e institucional– de la energía geotérmica dentro de la CFE. Como se verá, no se trata de *carbon lock-in* directamente, sino de inercias al cambio arraigadas dentro de la Comisión. Con lo anterior en mente a continuación se detalla en qué consisten los *lock-ins* tecnológicos, *lock-ins* institucionales y *lock-ins* conductuales y después se explican los efectos agregados del *carbon lock-in*.

1. Lock-in tecnológico

El *lock-in* tecnológico se genera por la vida útil prolongada de las infraestructuras asociadas a determinadas tecnologías y por las grandes inversiones necesarias para su construcción y operación, por ello, también se puede llamar “*lock-in* infraestructural”.¹⁷⁴ Las inversiones e infraestructuras previas causan una noción de costo agregado al momento de querer sustituir la tecnología, pues se “pierde” la inversión de tecnologías preexistentes. El *lock-in* tecnológico es muy relevante dentro del *carbon lock-in* por toda la infraestructura asociada de manera directa o secundaria a la producción de combustibles fósiles, por ejemplo: plataformas petroleras, pozos y ductos –infraestructura directa–, refinerías y gasolineras –infraestructura

¹⁷³ Seto et al., “Carbon Lock-In,” 427.

¹⁷⁴ *Ibid.*

secundaria—. ¹⁷⁵ La infraestructura contribuye al *carbon lock-in* porque su valor es dependiente de la quema de combustibles fósiles y, vice versa, la quema depende de estas infraestructuras de apoyo. ¹⁷⁶ Por ejemplo, una gasolinera sólo es valiosa si hay gasolina que distribuir y la gasolina depende de las gasolineras para llegar a sus consumidores.

En México, en 2023, el valor de la infraestructura de Pemex se valuó 73,053 millones de dólares (mdd) y la de CFE se valuó en 70,514 mdd. ¹⁷⁷ Dado que la mayoría de la generación eléctrica de CFE es con hidrocarburos, ambas cifras son indicativas del *lock-in* tecnológico de carbono en el país. Por este tipo de retos financieros es común el argumento de que la transición a tecnologías bajas en carbono es demasiado costosa, sin embargo, hay un consenso creciente de que atrasar la mitigación climática tendrá consecuencias más costosas. ¹⁷⁸

Visto de otro modo, en un escenario de transición acelerada hacia energías bajas en carbono, las infraestructuras relacionadas al consumo y producción de combustibles fósiles corren el riesgo de convertirse en activos varados. Esta es una expresión clara de los riesgos de transición a los que se enfrenta el sector energético. Sin embargo, es importante recordar que el otro tipo de riesgo son los riesgos físicos que se pueden sufrir por las consecuencias del cambio climático. ¹⁷⁹

¹⁷⁵ *Ibid.*, 428. El ET también contempla el papel de infraestructuras con demandas altas de energía. Para mayor información en ese caso, véase: Seto et al., “Carbon Lock-In,” 431- 433.

¹⁷⁶ *Ibid.*

¹⁷⁷ Estas cantidades posicionaron a Pemex y CFE como los propietarios número 56 y 62, respectivamente, con más valor infraestructural en 2023. Bentley Systems, *Bentley Infrastructure 500: Top Owners 2023 Edition*, PDF report (Exton, PA: Bentley Systems, 2023), 4, <https://www.bentley.com/wp-content/uploads/top-500-2023.pdf>.

¹⁷⁸ Seto et al., “Carbon Lock-In”, 429.

¹⁷⁹ Véase: Ajay Gambhir, Myles George, Haewon McJeon, et al., “Near-Term Transition and Longer-Term Physical Climate Risks of Greenhouse Gas Emissions Pathways,” *Nature Climate Change* 12 (2022): 88–96.

2. *Lock-in institucional*

A diferencia del *lock-in* tecnológico, el *lock-in* institucional es un “atributo intencional del diseño institucional, no un efecto secundario de fuerzas sistémicas”.¹⁸⁰ Rara vez surge por azar a partir de eventos tempranos en un proceso, al contrario, surge a partir de esfuerzos conscientes de poderosos actores económicos, sociales y políticos.¹⁸¹ Como indican Seto *et al.*, “[e]stos actores participan en esfuerzos intencionales y coordinados para estructurar reglas, normas y límites institucionales para promover sus objetivos e intereses en formas que no surgirían de otro modo.”¹⁸² Como se verá más adelante, las reformas legislativas son un ejemplo de reestructuración de normas para perpetuar una trayectoria. Dentro de la discusión del *carbon lock-in* mexicano, las Reformas Energéticas de 2013 y 2024 tienen ciertos elementos que perpetuaron el *carbon lock-in* y otros que abren ventanas de oportunidad para escaparlos. El caso se discute con mayor profundidad en el cuarto y quinto capítulo, respectivamente.

El *lock-in* institucional contempla el papel de instituciones privadas y públicas. Para el *carbon lock-in* en el sector energético mexicano es más relevante el papel de las públicas dado que el sector está controlado por el Estado con Pemex y CFE bajo la tutela de la SENER. La participación de instituciones gubernamentales y legislativas en las dinámicas del *lock-in* lo puede exacerbar por dos razones: 1) la habilidad de las políticas institucionales de imponerse ante las fuerzas de mercado y 2) una vez establecidas las instituciones gubernamentales su forma inicial tiende a persistir por períodos extendidos de tiempo.¹⁸³ En relación con el *lock-in* tecnológico, el primer punto implica qué tanto las empresas de una tecnología pueden responder a

¹⁸⁰ *Ibid.*, 433. Traducción propia del inglés, cita original: “...intended feature of institutional design, not an unintended by-product of systemic forces.”

¹⁸¹ *Ibid.*

¹⁸² *Ibid.*

¹⁸³ *Ibid.*, 824, 825.

las fuerzas de competencia de mercado.¹⁸⁴ Cuando la intervención gubernamental es limitada, las empresas pueden responder más a la competencia. En cambio, cuando hay mucha intervención, las fuerzas estándares de mercado pueden esquivarse en beneficio de las preferencias gubernamentales.¹⁸⁵

Aunado a lo anterior, en el caso particular de empresas o monopolios estatales puede que se reprima la innovación al redirigir incentivos hacia la ganancia de renta y el desarrollo de competencias regulatorias en beneficio de los estándares tecnológicos que les favorezcan.¹⁸⁶ Además, Unruh explica que la situación se puede empeorar con el hecho de que las personas en cargos regulatorios tienden a ser adversos al riesgo porque el fracaso de un sistema tecnológico podría traducirse en represalias personales o el final de su cargo. Por lo tanto, los incentivos se concentran en invertir en el diseño tecnológico dominante en lugar de en las alternativas que se perciben riesgosas.¹⁸⁷ No obstante, el gran impacto gubernamental ocurre “cuando el gobierno usa justificaciones formales para saltarse fuerzas de mercado y extender un sistema tecnológico mediante políticas públicas.”¹⁸⁸ Las justificaciones pueden apelar a varias razones, sin embargo, algunos temas comunes son la seguridad nacional, seguridad pública, argumentos a favor de monopolios naturales o a favor de servicios universales.¹⁸⁹ Este punto es crucial porque se puede conjugar con los objetivos de política energética. Como veremos más adelante, en México se ha apelado repetidas veces a la seguridad energética en defensa de los combustibles fósiles. Sin embargo, en años recientes también se han fomentado energías renovables con el mismo argumento. Esto permite introducir dos cosas importantes del *carbon lock-in* y los

¹⁸⁴ *Ibid.*, 824.

¹⁸⁵ *Ibid.*

¹⁸⁶ Thomas R. Casten, *Turning Off the Heat* (Amherst, NY: Prometheus Books, 1998). en *Ibid.*, 825.

¹⁸⁷ Unruh, “Understanding Carbon Lock-In,” 825.

¹⁸⁸ *Ibid.* Traducción propia del inglés. Cita original: “...when government uses formal justifications for overriding market forces and extending a technological system through public policy.”

¹⁸⁹ *Ibid.*

lock-ins en general. Puede haber *lock-ins* positivos y el *carbon lock-in* no es una condición permanente, al contrario, se puede “escapar” de él. En las próximas páginas se discuten estas situaciones. Sin embargo, antes de ello se presenta el *lock-in* conductual, el último tipo de *carbon lock-in*, y después se discuten los efectos del *carbon lock-in* y el alcance de la subteoría.

3. *Lock-in conductual*

Como su nombre lo indica, el *lock-in* conductual considera los aspectos conductuales que refuerzan al *carbon lock-in*. Contempla dos escalas de mecanismos. Por un lado, pondera a la toma de decisiones a nivel individual y, por otro, a las conductas fomentadas mediante estructuras sociales.¹⁹⁰ Ambos niveles pueden generar resistencias hacia los cambios de tecnologías. A escala individual, las personas podrían evitar fomentar cambios por los juicios sociales de la inversión social que públicamente conlleva probar un producto o tecnología cuyo desempeño no se ha comprobado.¹⁹¹ A escala social, los CTI tienen “[p]ráticas sociales compartidas en rutinas y normas que coevolucionan con las tecnologías, infraestructuras, redes sociales, mercados, políticas y reglas culturales en turno”.¹⁹² Agregados, el nivel individual y el social ilustran la contraparte social de los sistemas sociotécnicos que pueden contribuir al *carbon lock-in*.

¹⁹⁰ Seto et al., “Carbon Lock-In”, 440.

¹⁹¹ *Ibid.*

¹⁹² Frank W. Geels y Johan Schot, “The Dynamics of Transitions: A Socio-Technical Perspective,” en *Transitions to Sustainable Development: New Directions in the Study of Long Term Transformative Change*, ed. Jan Grin, John Rotmans y Johan Schot, parte I (Londres: Routledge, 2010). y Boelie Elzen y Anna Wieczorek, “Transitions towards Sustainability through System Innovation,” *Technological Forecasting and Social Change* 72, no. 6 (2005): 651–61. en *Ibid.*, traducción propia del inglés. Cita original: “Socially shared practices refer to routines and norms that coevolve with the technologies, infrastructures, social networks, markets, policies, and cultural norms in place.”

4. Consecuencias del *carbon lock-in*, también fuentes del *carbon lock-in*

La gran consecuencia del *carbon lock-in* es la permanencia de combustibles fósiles por inercias al cambio. En términos amplios, limita la mitigación climática. En términos prácticos, limita el desarrollo de tecnologías bajas en carbono –entre ellas, los usos de la geotermia–. Las inercias al cambio se componen de vínculos que se retroalimentan entre los sistemas técnicos, institucionales y sociales del CTI. En otras palabras, los *lock-ins* expuestos –tecnológico, institucional y conductual– suelen reforzarse entre sí, aunque no sea su finalidad intencionada. A continuación, se exponen algunas consecuencias específicas del *carbon lock-in*, es decir, las fuentes de inercia al cambio. Hay consecuencias que se vinculan más a un subtipo de *lock-in* en específico, empero, por naturaleza están interrelacionadas con el resto de los *lock-ins*.

En primera instancia, respecto al *lock-in* tecnológico, además de “subir” el costo de las transiciones tecnológicas por las infraestructuras que dejan de utilizarse, esas inversiones también fijan tecnologías secundarias y decisiones de consumo a futuro. Por ejemplo, la construcción de carreteras favorece el uso de automóviles y la decisiones personales de escoger al auto como medio de transporte. En relación a la geotermia, un claro ejemplo es que la construcción de casas o inmuebles con sistemas de calefacción alimentados por gas o electricidad impide o dificulta la decisión de instalar un sistema de calefacción geotérmico con tecnologías de bombas de calor –*geothermal heat pumps*–.¹⁹³

El dominio de una tecnología también se acompaña de disciplinas o instituciones académicas que la respaldan. Un ejemplo es la inclinación positiva del Instituto Politécnico Nacional (IPN) hacia la industria petrolera. Hasta la fecha, la

¹⁹³ Cabe recordar que las pre condiciones iniciales para poder instalar un sistema de calefacción geotérmico dependen de características geológicas y geográficas. El ejemplo supone que tanto los sistemas de calefacción geotérmicos así como los alimentados por gas y los eléctricos son técnicamente posibles.

licenciatura en geofísica del IPN tiene un programa de estudios más afín a la explotación del crudo que otras instituciones del país. Como es el caso con el IPN, estas disciplinas pueden crear redes de profesionales e instituciones que son invaluable para el crecimiento del sistema.¹⁹⁴ Sobre esta línea, los jóvenes suelen preferir entrar al mundo profesional en donde hay oportunidades comprobadas, en lugar de someterse al riesgo de una carrera incierta con una tecnología alternativa.

Otro efecto similar es el surgimiento de uniones y asociaciones de la disciplina para tener espacios de representación dentro del sistema.¹⁹⁵ Por ejemplo, en EEUU se creó la *United Autoworkers Union* en 1936 para que los trabajadores de la industria automotriz tuvieran representación, mejorar sus condiciones de trabajo y para apropiarse el valor creado por el sistema tecnológico creciente.¹⁹⁶ En la industria geotérmica nacional, en 1991 se fundó la Asociación Geotérmica Mexicana (AGM) para “reforzar la colaboración académica, científica, industrial y tecnológica entre la comunidad geotérmica nacional y entre sus nexos internacionales.”¹⁹⁷ La AGM no se relaciona directamente con el *carbon lock-in*, sino con otros *lock-ins* en el desarrollo de la geotermia. El caso se discutirá en el próximo capítulo.

Cómo reaccionan las empresas a la posibilidad de cambio es otra consecuencia del *carbon lock-in*. Empresas adversas al riesgo son menos propensas a apostar por otras tecnologías cuando no tienen certidumbre sobre las preferencias y las posibles respuestas de otras empresas e industrias.¹⁹⁸ Sobre la misma línea, “[a] menos de que los innovadores tengan certeza de que la nueva tecnología se va a convertir en el diseño dominante y va a atraer redes de apoyo, puede que se valore como demasiado

¹⁹⁴ Unruh, “Understanding Carbon Lock-In,” 823.

¹⁹⁵ *Ibid.*

¹⁹⁶ *Ibid.*, 824.

¹⁹⁷ Asociación Geotérmica Mexicana (AGM), “Acerca de nosotros,” en *AGM*, sitio web, última actualización 10 de octubre de 2024, consultado el 10 de julio de 2025, <https://geotermia.org.mx/agm/>.

¹⁹⁸ Unruh, “Understanding Carbon Lock-In,” 823.

riesgosa para hacer las inversiones irreversibles para promover a la tecnología y sacarla al mercado.”¹⁹⁹ Como se verá, estos puntos son particularmente relevantes para el desarrollo de la geotermia tanto en México como en el mundo. Su naturaleza técnica conlleva mucho riesgo e incertidumbre, sobre todo en las etapas de exploración de los recursos. Sin embargo, las nuevas tecnologías de explotación reducen parte de la incertidumbre asociada a la geotermia y existen mecanismos institucionales de fomento que pueden compensar los riesgos con miras a aprovechar los beneficios de la explotación geotérmica. Esta discusión se retoma en el quinto capítulo.

Asimismo, cuando las empresas o instituciones de la tecnología dominante se enfrentan a la posibilidad de que el cambio tecnológico destruya el valor de su tecnología, frecuentemente son incapaces de cambiarse a las alternativas.²⁰⁰ En cambio, intentan sostener la tecnología actual mediante mejoras incrementales o “comportamiento rentista”.²⁰¹ Por lo tanto, menciona Unruh, el incentivo para los productores de la tecnología dominante no es innovar, sino inhibir a las nuevas tecnologías y evitar que capturen parte del mercado.²⁰²

En suma, las consecuencias del *carbon lock-in* son autorreferenciales e inhiben la acción tecnológica, institucional, política y social para adoptar tecnologías bajas en carbono. Estos efectos del *carbon lock-in* hacen que los CTI sean difíciles de desplazar y tiendan a bloquear tecnologías alternativas por grandes periodos de

¹⁹⁹ *Ibid.* Traducción propia del inglés. Cita original: “Unless innovators are confident that a technology will become the new dominant design and bring along supporting networks, it may be judged too risky to make the required irreversible investments to market the new technology.”

²⁰⁰ Rebecca Henderson y Kim Clark, “Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms,” *Administrative Science Quarterly* 35, no. 1 (1990): 9–30. y Dorothy Leonard-Barton, “Core Capabilities and Core Rigidities: A Paradox in Managing New Product Development,” *Strategic Management Journal* 13, no. 1 (1992): 111–25. en Gregory C. Unruh, “Escaping Carbon Lock-In,” *Energy Policy* 30, no. 4 (2002): 321.

²⁰¹ Arnold C. Cooper y Dan Schendel, “Strategic Responses to Technological Threats,” *Business Horizons* 19, no. 1 (1976): 61–69. en Unruh, “Escaping Carbon Lock-In,” 321. Traducción propia del inglés. Cita original: “rent seeking behavior.”

²⁰² “Escaping Carbon Lock-In,” 321.

tiempo, incluso si las alternativas demuestran mejoras y ventajas en comparación al CTI establecido.²⁰³

5. *Lock-in de energías renovables*

El *carbon lock-in* impone retos considerables al despliegue de todas las tecnologías bajas en carbono, entre las cuales destacan las energías renovables. No obstante, el desarrollo de las renovables también tiene *lock-ins* propios. En el presente, casi el 90% de la producción eléctrica mundial a base de energías renovables se compone de tres tecnologías energéticas: hidroeléctrica, eólica y solar.²⁰⁴ Éstas han predominado sobre otras porque son relativamente fáciles de desplegar y es sencillo evaluar la disponibilidad del recurso natural de donde extraen energía –cuerpos hídricos, viento y radiación solar, respectivamente–. Además, en el caso particular de la eólica y solar, su costo se ha reducido significativamente gracias a la superación de curvas de aprendizaje en sus primeras etapas de desarrollo y a la optimización y comercialización de la producción a escala de sus partes tecnológicas. En consecuencia, además de ser las energías renovables más desplegadas, se han convertido en las más *populares*.

Por lo tanto, de manera semejante al *carbon lock-in*, la trayectoria existente de algunas energías renovables predominantes, reduce la habilidad de cambiar o adaptar un sistema energético hacia otras alternativas tecnológicas, regulatorias, sociales o económicas que posibiliten el desarrollo de energías renovables distintas.²⁰⁵ Asimismo, las fuentes y consecuencias del *lock-in* renovable comparten los mismos

²⁰³ Unruh, “Understanding Carbon Lock-In,” 818.

²⁰⁴ REN21. *Renewables 2022 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat, 2022. en Eitan and Hekkert, “Locked in Transition?”, 4.

²⁰⁵ Eitan and Hekkert, “Locked in Transition?”, 2. El trabajo citado habla específicamente de las energías renovables, sin embargo, se puede argumentar que el *lock-in* de las renovables impacta a las energías limpias en general.

mecanismos que el *carbon lock-in*: aspectos tecnológicos, institucionales y conductuales, así como históricos, políticos y económicos.²⁰⁶

Otra manera en la que se manifiesta el *lock-in* renovable es considerar a estas energías como un bloque homogéneo de tecnologías con las mismas ventajas y desventajas; por ejemplo, asumir su intermitencia es común. Esto las puede descalificar en bloque y evitar que se evalúen individualmente. Inclusive, influencias del *lock-in* renovable como ésta pueden incrementar los incentivos de apoyar sistemas energéticos fósiles.²⁰⁷ Además, también provoca comparaciones inequitativas entre energías renovables, en varios casos a causa del desconocimiento de la existencia o características de distintos tipos de energía. En el Reino Unido, por ejemplo, hay un gran potencial técnico de energía mareomotriz. Se estima que podría cubrir hasta 20% del consumo eléctrico del país.²⁰⁸ Sin embargo, el uso de energía mareomotriz no es ampliamente fomentado en comparación a otras renovables, en parte por desconocimiento de su potencial que a su vez incrementa el riesgo asociado con su inversión.²⁰⁹ Aunado a lo anterior, tomadores de decisiones locales suelen evitar a la mareomotriz en favor de renovables más comunes, como la energía eólica.²¹⁰

En el caso de la geotermia, también padece comparaciones inequitativas frente a otras renovables. Como se expuso en secciones anteriores, sus beneficios potenciales son amplios, entre los cuales destaca su versatilidad de aplicaciones

²⁰⁶ *Ibid.*, 1.

²⁰⁷ Simona O. Negro, Floortje Alkemade y Marko P. Hekkert, “Why Does Renewable Energy Diffuse So Slowly? A Review of Innovation System Problems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, no. 6 (1 de agosto de 2012): 3836–3846. en *Ibid.*, 2.

²⁰⁸ Department for Energy Security and Net Zero y Department for Business, Energy & Industrial Strategy, “Wave and tidal energy: part of the UK’s energy mix,” *GOV.UK*, publicado el 22 de enero de 2013, consultado el 9 de noviembre de 2025, <https://www.gov.uk/guidance/wave-and-tidal-energy-part-of-the-uks-energy-mix>

²⁰⁹ Tarik Dogru, Umit Bulut, Emrah Kocak, Cem Isik, Courtney Sues y Ercan Sirakaya-Turk, “The Nexus between Tourism, Economic Growth, Renewable Energy Consumption, and Carbon Dioxide Emissions: Contemporary Evidence from OECD Countries,” *Environmental Science and Pollution Research* 27, n.º 32 (2020): 40930–48. en Eitan and Hekkert, “Locked in Transition?”, 5.

²¹⁰ Yulia Cholteeva, “The State of UK Tidal Energy,” *Power Technology*, 2021, consultado el 27 de agosto de 2022, <https://www.power-technology.com/analysis/uk-tidal-development/> en *Ibid.*, 5.

generación constante de electricidad sin requerir respaldo, su ocupación limitada de espacio y su independencia de cadenas de suministro de minerales raros. Es comprensible que en la mayor parte del mundo no se le contemple dado que su aprovechamiento es relativamente inaccesible. Sin embargo, en México, es necesario incorporarla seriamente a las discusiones y decisiones en torno a las energías renovables. No obstante, fuera del gremio energético, la realidad es que en el presente es común que no se conozca a la geotermia como fuente de energía y mucho menos que tiene una trayectoria de desarrollo nacional.

A pesar de los obstáculos que el *lock-in* de las energías renovables y el *carbon lock-in* le presentan al desarrollo geotérmico, es importante recordar que no forjan situaciones inamovibles. En particular, el *carbon lock-in* no es una situación permanente, sino, un estado de la cuestión persistente.²¹¹ Sobre estas líneas, a continuación se presenta el concepto del *lock-in* positivo. La idea clave de este *lock-in* es utilizar los efectos del *carbon lock-in* como indicadores de fomento para asegurar el desarrollo a largo plazo de una tecnología. También se presenta cómo escapar del *carbon lock-in*. Es decir, qué condiciones se necesitan para salir del *carbon lock-in* y poder impulsar exitosamente otras tecnologías.

6. *Lock in positivo*

Como se mencionó anteriormente, un *lock-in* puede ser positivo si sus consecuencias y externalidades fomentan un *status quo* deseable. Para el desarrollo de la geotermia, podría tratarse de cualquier *lock-in* que fomente un camino de descarbonización que contemple a la geotermia o incluso esfuerzos situados para el desarrollo de la industria geotérmica nacional. En particular, el *lock-in* institucional se puede

²¹¹ Unruh, "Understanding Carbon Lock-In," 818. y Gregory C. Unruh, "Escaping Carbon Lock-In," *Energy Policy* 30, no. 4 (2002): 317.

considerar positivo.²¹² Esto sucede cuando las instituciones velan por los intereses de la industria que se busca promover. Por ejemplo, bajo esta perspectiva, el *carbon lock-in* es positivo para la industria petrolera. No obstante, la noción del *lock-in* positivo está estrechamente ligada con escapar el *carbon lock-in*. Es decir, para superar el *carbon lock-in* y sus consecuencias, parte del proceso es conseguir plasticidad institucional para provocar cambio institucional e instaurar un *lock-in* positivo.²¹³ El quinto capítulo permite retomar este tipo de *lock-in* por los cambios legislativos más recientes respecto a la geotermia en México. Por ende, el caso se retoma con mayor profundidad en él.

7. Escapar del carbon lock-in

A pesar de las barreras que impone el *carbon lock-in*, a lo largo de la historia han ocurrido varios cambios tecnológicos e institucionales; por lo tanto, no se debe asumir que un estado de la cuestión tecno-institucional es permanente.²¹⁴ Existen distintas formas en las que se puede inducir el cambio: cambios tecnológicos, acercamientos desde las políticas públicas, impulsos externos institucionales e impulsos conductuales. Inducir el cambio de tal manera que el CTI deja de tener *carbon lock-in* se denomina “escapar del *carbon lock-in*” –*escaping carbon lock-in*–. Unruh introdujo el concepto en su artículo *Escaping Carbon Lock-In* publicado en 2002 en respuesta al primer artículo en donde presenta al EC, *Understanding Carbon-Lock-In*, publicado en el 2000.²¹⁵ Enseguida se exponen los modos de escapar el

²¹² Seto et al., “Carbon Lock-In,” 437.

²¹³ *Ibid.*

²¹⁴ Arnulf Grübler, *The Rise and Fall of Infrastructures* (Heidelberg: Springer, 1990). y Jesse H. Ausubel, “Regularities in Technological Development: An Environmental View,” en *Technology and Environment*, ed. Jesse H. Ausubel y Hedy E. Sladovich (Washington, DC: National Academy Press, 1989). en Unruh, “Escaping Carbon Lock-In,” 320.

²¹⁵ Unruh, “Understanding Carbon Lock-In.”, 817-830 y Unruh, “Escaping Carbon Lock-In,” 317-325.

carbon lock-in. En general, gracias a la naturaleza autorreferencial de los CTI, estos cambios suelen tener una naturaleza exógena o reformativa.²¹⁶

Del lado tecnológico, hay tres conjuntos de cambios que pueden inducirse. En primer lugar, los avances tecnológicos significativos que faciliten la adopción de la tecnología alternativa en cuestión es una fuente exógena de cambio. La innovación no tiene que pasar en el mismo lugar donde se busca implementar, sino que se puede inducir una tecnología que haya madurado en otras partes. Con la geotermia, este podría ser el caso con los sistemas EGS que ya operan en EEUU y partes de Europa. En segundo lugar, puede haber innovaciones de mercado que otorgan espacio a las tecnologías. No se trata tanto de que una tecnología sea buena por sí misma, o de la pura existencia de una innovación tecnológica significativa, sino que se requiere una innovación de mercado para darle lugar.²¹⁷ En tercer lugar, otra estrategia para escapar del *lock-in* tecnológico es enfocarse en desarrollo tecnológico en nichos de especialización.²¹⁸ Es común que innovaciones “emerjan en pequeños espacios de mercado en donde se valoran los atributos únicos de la tecnología y las limitaciones iniciales se perciban menos como desventaja.”²¹⁹ Hay tecnologías fósiles que se han beneficiado de esta estrategia. Por ejemplo, las turbinas de gas superaron el *lock-in* tecnológico de las turbinas de vapor al desarrollarse en nichos específicos de producción.²²⁰

²¹⁶ Unruh, “Escaping Carbon Lock-In,” 317.

²¹⁷ *Ibid.*, 321.

²¹⁸ René Kemp y Luc Soete, “The Greening of Technological Progress: An Evolutionary Perspective,” *Futures* 24, no. 5 (1992)., René Kemp, Johan Schot y Remco Hoogma, “Regime Shifts to Sustainability through Processes of Niche Formation: The Approach of Strategic Niche Management,” *Technology Analysis & Strategic Management* 10, no. 2 (1998). y Johan Schot, Boelie Elzen y Remco Hoogma, “Strategies for Shifting Technological Systems: The Case of the Automobile System,” *Futures* 26, no. 10 (1994). en Unruh, “Escaping Carbon Lock-In,” 322.

²¹⁹ Clayton M. Christensen, *The Innovator's Dilemma* (Cambridge, MA: Harvard Business Press, 1997). en Unruh, “Escaping Carbon Lock-In,” 322.

²²⁰ Jorge Islas, “Getting Round the Lock-In in Electricity Generating Systems: The Example of the Gas Turbine,” *Research Policy* 26, no. 1 (1997), 63-64.

También existen cambios exógenos institucionales como mecanismos de escape del *carbon lock-in*. Como recalca Unruh, las instituciones juegan un papel importante en la extensión de grandes sistemas tecnológicos y, por lo tanto, cambios en los marcos institucionales influyen en la evolución de los CTI.²²¹ No obstante, para que las instituciones induzcan cambios tecnológicos, las prioridades institucionales tienen que cambiar y esto suele ser un proceso gradual.²²² Por ello, la mayor parte de los arreglos institucionales se caracterizan por periodos largos de estabilidad relativa “marcada por cambios radicales poco frecuentes”.²²³ En consecuencia, la transición institucional requiere de momentos de plasticidad que abran ventanas de oportunidad al cambio.

En particular, hay tres acercamientos generales de políticas públicas que son progresivamente disruptivos para los sistemas tecnológicos con *carbon lock-in*: 1) no hacer ningún cambio, pero tratar las emisiones de GEI, 2) modificar componentes seleccionados o procesos del sistema, pero mantener la arquitectura general del sistema –denominado proceso de continuidad– y 3) reemplazar enteramente el sistema –discontinuidad–.²²⁴ En México el caso más común es la continuidad. El papel de las energías renovables y de la geotermia en las Reformas Energéticas de 2013 y 2024 dan ejemplos de ello, los casos se discuten en el cuarto y quinto capítulo, respectivamente.

Finalmente, a nivel socio conductual, hay dos condiciones deseables para escapar del *carbon lock-in*. Están los impulsos sociales y los agentes emprendedores.

²²¹ Unruh, “Escaping Carbon Lock-In,” 322.

²²² Oliver E. Williamson, *Markets and Hierarchies: Analysis and Antitrust Implications* (New York: The Free Press, 1975). y Oliver E. Williamson, *The Economic Institutions of Capitalism: Firms, Markets, Relational Contracting* (New York: The Free Press, 1985). en Unruh, “Escaping Carbon Lock-In,” 322.

²²³ Douglass C. North, *Structure and Change in Economic History* (New York: Norton, 1981) y Douglass C. North, *Institutions, Institutional Change and Economic Performance* (Cambridge: Cambridge University Press, 1990). en Unruh, “Escaping Carbon Lock-In,” 322. Traducción propia del inglés. Cita original: “*punctuated by infrequent radical change.*”

²²⁴ Unruh, “Escaping Carbon Lock-In,” 318.

Los impulsos *–nudges–* sociales son acciones que alteran el comportamiento de las personas en un modo particular sin cambiar significativamente sus incentivos económicos y sin prohibirles opciones de acción entre las cuales decidir.²²⁵ No obstante, pueden ser controversiales porque se perciben como paternalistas. En cambio, los agentes emprendedores son actores que impulsan activamente un cambio. Pueden pertenecer al sector tecnológico o institucional, desde donde marcan la pauta hacia las nuevas tecnologías. Institucionalmente, los agentes emprendedores suelen promover una agenda con oportunidades al cambio. Sus probabilidades de éxito aumentan cuando se justifican con argumentos de interés nacional, como podrían ser los objetivos de política energética en el caso de la geotermia. En el quinto capítulo se retoma esta discusión.

En conjunto, cabe destacar que la presencia de los elementos mencionados no necesariamente asegura que se pueda escapar el *carbon lock-in*. No obstante, el precedente histórico todavía es limitado y sí ha habido casos de una participación creciente de tecnologías bajas en carbono en las matrices energéticas de ciertos países. Un caso notorio es Francia. En 2023, su mayor fuente de energía fue la energía nuclear con 40.3% de su matriz energética.²²⁶ Aunada a otras energías bajas en carbono, representaron el 54.5% de la matriz.²²⁷ Además, el impulso de Francia hacia mayor desarrollo de la energía nuclear es un ejemplo de un choque exógeno, pues la industria se fortaleció en respuesta a los embargos petroleros de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) en 1973.²²⁸ Aunque el caso francés es ilustrador, ejemplos como estos son escasos y representan uno de los límites actuales

²²⁵ Richard H. Thaler y Cass R. Sunstein, *Nudge: Improving Decisions about Health, Wealth, and Happiness* (New Haven, CT: Yale University Press, 2008). en Seto *et al.*, “Carbon Lock-In,” 440.

²²⁶ International Energy Agency. “France: Energy Mix.” Última actualización 2025. <https://www.iea.org/countries/france/energy-mix>.

²²⁷ *Ibid.*

²²⁸ Kathleen M. Araújo, “French Nuclear Energy,” en *Low Carbon Energy Transitions* (Oxford: Oxford University Press, 2017), 84.

de la subteoría del *carbon lock-in*. Sobre esta línea, su alcance y limitaciones generales se presentan a continuación.

8. Alcance del *carbon lock-in*

Por último, es importante reconocer el alcance del uso del *carbon lock-in* tanto para la historia de la geotermia nacional, así como para analizar transiciones sustentables. La esencia y el objetivo del *carbon lock-in* –ofrecer explicaciones a las barreras de difusión de tecnologías bajas en carbono– permiten utilizar el concepto para cualquier tipo de tecnología baja en carbono, como los usos de la geotermia. Sin embargo, dado que la idea se fundamenta en explicaciones a nivel macro tiene ciertos límites en su aplicación. Al recurrir a distintas disciplinas para categorizar los *lock-ins* y reconocer diversos tipos de fuentes materiales y no materiales de los mismos –por ejemplo, explicaciones técnicas, políticas, sociales o incluso económicas y psicológicas– su marco conceptual está disperso entre varios campos de estudio y publicaciones académicas. Esto dificulta su aplicación teórica para casos de estudio. Sin embargo, en los últimos años ha habido esfuerzos para enfrentar estas brechas académicas. Notoriamente, Gregory Trencher *et al.* publicaron una revisión de literatura en 2020 con un marco conceptual completo del *carbon lock-in* enriquecido con otros estudios de transiciones energéticas. Además, aplicaron su marco al caso de estudio del *carbon lock-in* de la industria de carbón japonés.²²⁹ Estudios como éste permiten aterrizar la teoría del *carbon lock-in* y evaluar su relevancia después de dos décadas de su publicación original. Con lo anterior en mente, el resto de la investigación revisa cronológicamente momentos de la historia de la geotermia en México y presta

²²⁹ Gregory Trencher, Adrian Rinscheid, Mert Duygan, Nhi Truong y Jusen Asuka, “Revisiting Carbon Lock-In in Energy Systems: Explaining the Perpetuation of Coal Power in Japan,” *Energy Research & Social Science* 69 (2020), 1-17.

atención a cómo el *carbon lock-in* aplica para explicar algunas de las causas de su poco desarrollo.

II. Marco metodológico

El marco metodológico de la tesis se expone en dos partes. La primera presenta los métodos de investigación que se emplearon. Se discuten los criterios de elección de estos métodos en lugar de otros y las aportaciones de cada uno. La segunda parte señala los logros y limitaciones del diseño de la investigación. No obstante, cabe destacar que el capítulo conclusivo de la investigación señala de manera más exhaustiva estos límites de la tesis, además de los relacionados con su metodología.

A. Metodología

La tesis se realizó empleando una metodología cualitativa. Se utilizaron dos métodos principales: análisis documental hemerográfico y entrevistas semi estructuradas. También se consultaron presentaciones y entrevistas publicadas en línea y se asistió al XXXI Congreso Nacional de la Asociación Geotérmica Mexicana (2025) para escuchar las ponencias y conversar con los participantes. En seguida se profundiza sobre el criterio de selección de cada método, las técnicas privilegiadas y sus aportes a la investigación.

El análisis documental fue el sustento y punto de partida de toda la investigación. Fue el método primordial para completar el marco teórico y permitió explorar el panorama energético en México y el papel de la geotermia en él. En total, se consultó una variedad de fuentes primarias y secundarias. Las secundarias fueron en su mayoría artículos y libros académicos así como reportes de organizaciones internacionales especializadas en energía, particularmente para fundamentar toda la

teoría de la tesis y para identificar momentos cronológicos significativos en la historia de la geotermia en México. Las fuentes primarias sirvieron sobre todo para analizar a profundidad momentos históricos –por ejemplo, Reformas Energéticas–. Se utilizaron documentos gubernamentales y textos legislativos, en particular las leyes geotérmicas emitidas dentro de los paquetes de Reformas.

Por su lado, las entrevistas fueron cruciales para la investigación. Se escogió hacerlas con la suposición de que la perspectiva de los y las profesionales podría aportar conocimiento no documentado. A los entrevistados se les preguntó cómo vivieron y cómo explican los cambios en la intensidad del desarrollo de la geotermia en el país –al final de la tesis se anexan algunos ejemplos de preguntas–. Asimismo, las entrevistas permitieron explorar los matices de las razones detrás del desarrollo limitado de la geotermia. En otras palabras, permitieron ir más allá de explicaciones comunes que se limitan a señalar que la geotermia es cara y riesgosa. Se escogieron entrevistas semiestructuradas para poder profundizar en la trayectoria, perspectiva y conocimiento de cada persona. Además, las entrevistas se agendaron bajo acuerdo de anonimidad con la intención de brindar más espacio a las respuestas. Como se anticipó, una de las mayores aportaciones de las entrevistas fue conocer elementos de la historia de la geotermia que no están publicados. El vínculo con los entrevistados se estableció gracias a la Dra. Isabelle Rousseau, quien contactó inicialmente al Dr. Gerardo Hiriart, experto en geotermia con una trayectoria importante en la CFE y en la UNAM. El contacto con Hiriart fue clave para conocer a más entrevistados gracias a la técnica de bola de nieve. En su mayoría, los entrevistados recomendaban contactar a alguien en específico por su experiencia con un tema o situación en particular.

De igual manera, se utilizaron presentaciones y entrevistas publicadas en línea para complementar el análisis documental y las entrevistas. Como se verá, las discusiones públicas sobre el desarrollo de la geotermia en México se están reactivando tras la Reforma Energética de 2024. Por lo tanto, el material publicado en línea sirvió para capturar la dirección hacia la cual se pretende impulsar el sector. Por último, se asistió al XXXI Congreso Nacional de la Asociación Geotérmica Mexicana, que tuvo lugar en Cuernavaca en mayo de 2025. El congreso fue valioso porque reunió a la mayoría de los expertos y expertas nacionales en geotermia. Muchos de ellos son autores citados en la investigación y algunos participaron en las entrevistas. Por lo tanto, fue particularmente interesante escuchar sus presentaciones en persona. De igual manera, dada la publicación de la nueva Ley de Geotermia, representantes de la SENER participaron en el congreso para presentarle al gremio las atribuciones de la LG y compartir la visión que tiene la secretaría para la geotermia en el futuro.

B. Logros y limitaciones

Existen pocos trabajos académicos que estudian a la geotermia mexicana desde las ciencias sociales. Por lo tanto, uno de los logros más importantes de la tesis fue prestarle atención a esta fuente de energía y querer entender su relevancia y potencial a pesar de representar una parte muy pequeña de la generación eléctrica del país. Además, la tesis recopila información técnica y teórica con la intención de no descuidar el lado puramente técnico de la geotermia que las ciencias naturales e ingeniería suelen atender. Con ello, aunado al análisis teórico e histórico, se busca ofrecer al lector una perspectiva completa de lo que conlleva desarrollar una fuente de

energía más allá del potencial técnico y, visto desde el punto de vista inverso, más allá de las políticas públicas.

Ahora bien, la tesis tiene varios límites que vale la pena señalar. En términos generales, fue la primera vez que la autora realizó un trabajo de investigación de esta magnitud. Esto sumado a la curva de aprendizaje que el tema presentó a la autora por ser la primera vez en estudiar sistemáticamente el sector energético mexicano, la geotermia y el paradigma del neoinstitucionalismo histórico –en específico, el *carbon lock in*– es probable que una que otra imprecisión o falta de contextualización en algún argumento no haya sido identificada, a pesar del intento consciente por evitarlo.

Además, el número reducido de entrevistados (11) limita los hallazgos y el alcance de la investigación.²³⁰ En su mayoría el conjunto entrevistado tiene una trayectoria profesional en la CFE. Una investigación de mayor escala con el mismo método podría priorizar entrevistar a mayor diversidad de personas con carreras profesionales en los sectores públicos y privados y con experiencia en distintas instituciones –por ejemplo, contactar a más personas de SENER–. No se realizaron más entrevistas por distintos factores. De entrada, la autora, al ser estudiante de licenciatura, no disponía de una amplia red de profesionistas en el campo disciplinario. Como se mencionó, el apoyo de la Dra. Rousseau y el Dr. Hiriart fue crucial para establecer los contactos iniciales; sin embargo, en ocasiones las personas no estuvieron disponibles para ser entrevistadas. Además, la mayoría de las entrevistas fueron en línea, lo que limitó la extensión y hasta cierto punto la compenetración (*rapport*) en el diálogo entre la autora y los entrevistados. Por ejemplo, en momentos las conexiones de internet eran inestables y eso cortaba la conversación y, en general, el ligero retraso en el audio de cada persona dificultó

²³⁰ Se entrevistaron once personas, entre las cuales, una participó en tres entrevistas, por lo que el número total de entrevistas fue trece.

hacer preguntas de seguimiento sin interrumpirlas. No obstante, cabe resaltar que las entrevistas en línea permitieron hablar con personas fuera de la Ciudad de México. Varias estaban basadas en otras ciudades del país o incluso en otros países, como EEUU o Japón. Tampoco se realizaron más entrevistas debido a los altos costos de preparación técnica y académica *ex ante* a cada entrevista, particularmente para una estudiante de licenciatura en Relaciones Internacionales –un tema no inmediatamente relacionado con producción energética–. Sin mencionar los retos profesionales, académicos y personales de la autora, que en ocasiones limitaron la capacidad de obtener un mayor número de personas entrevistadas.

De igual manera, un límite metodológico y teórico de la tesis es que estudia el desarrollo de la geotermia principalmente en términos de su capacidad instalada para generación. Sin embargo, existen otros factores técnicos, infraestructurales, políticos y económicos que impactan las posibilidades de desarrollo de una tecnología energética. Por ejemplo, el estado y capacidad de la infraestructura de distribución y transmisión de electricidad. En el caso de la geotermia –u otras energías–, incluso si se aumentara significativamente su capacidad instalada, dependería de la capacidad de las redes de transmisión para alcanzar a los usuarios finales. En la conclusión general de la tesis se revisitan estas consideraciones y limitaciones, y se sugieren brevemente vías futuras de investigación.

Conclusión

Este capítulo presentó la metodología y concluyó el marco teórico de la tesis. Por un lado, demuestra a cuáles objetivos de política energética podría servir, en otras palabras, con qué razones se podría justificar su desarrollo. Ahora bien, a pesar de estas razones y sus ventajas técnicas, la introducción a la subteoría del *carbon lock-in*

a partir de la relevancia de los hidrocarburos en el sector eléctrico nacional permite explicar parte de la brecha entre el nivel de desarrollo geotérmico y el potencial del país. Una vez sentadas estas bases, surgen las preguntas: ¿cómo se ha justificado el desarrollo de la geotermia en el país? ¿Qué lo motivó? ¿Cómo le ha afectado el *carbon lock-in*? ¿Qué otros *lock-ins* tiene? ¿Qué otras razones explican su asimetría entre potencial y desarrollo? Los próximos tres capítulos aplican el marco teórico para contar la historia contemporánea de la geotermia en México y contestar, en la medida de lo posible, estas incógnitas.

Capítulo III

Inicio del desarrollo contemporáneo geotérmico en México: mediados del siglo XX a inicios del siglo XXI

“La geotermia nace con recurso nacional, con tecnología que se genera en México, con investigación que se genera en México, con investigadores e investigadoras que se generan en México.”

- Jesús Eduardo Robles Chávez, Director de Coordinación de Estrategia de Energías Renovables, SENER, Apertura del XXXI Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana, Cuernavaca, 22 de mayo de 2025.

Introducción

El desarrollo de la energía geotérmica en México inició a mediados de la década de los 1950 tras el reconocimiento estatal del potencial nacional de esta fuente de energía. Progresivamente, la CFE construyó su brazo institucional especializado en geotermia hasta alcanzar un auge geotérmico en los 1980 y 1990 y lograr incorporar a la geotermia al sistema energético nacional. No obstante, para inicios del siglo XXI el desarrollo geotérmico se estancó en una etapa de menor desarrollo, en parte por razones directamente relacionadas a la geotermia y en parte por retos exógenos a ella. Este capítulo presenta los hechos cronológicos del origen, auge y eventual estancamiento del desarrollo de la energía geotérmica en México a principios de siglo. La exposición pretende señalar las causas de los rezagos del desarrollo y también señala expresiones del *carbon lock-in* y cómo fueron impactando a la geotermia. Asimismo, se demuestra con qué propósitos de política energética se ha justificado el desarrollo de la geotermia en México, en otras palabras, de qué manera se ha valorado la geotermia como fuente de energía para impulsarla. Asimismo, se apuntan tendencias que afectaron qué tanto se desarrolló la geotermia a lo largo del tiempo y

se señalan retos endógenos y exógenos presentes alrededor de la historia de la geotermia, que en última instancia limitan las posibilidades de su desarrollo.

I. La fundación de la CFE y sus objetivos

A finales del siglo XIX, empresas privadas desarrollaron la electricidad en México para su autoconsumo. No fue hasta la década de los 1930 que el gobierno se propuso centralizar al sector eléctrico mexicano y fundó la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para la generación y el abastecimiento del servicio en el país. Antes de la creación de la CFE, las prácticas nacionales de la industria eléctrica no eran uniformes ni las redes de transmisión estaban interconectadas.²³¹ Tres compañías –en su mayoría– vendían el servicio de electricidad. *The Mexican Light and Power Company*, *The American and Foreign Power Company* y la Compañía Eléctrica de Chapala.²³² Dado el vínculo entre el suministro de energía y el desarrollo económico de un Estado, la nacionalización es un principio indispensable para entender el diseño de CFE, la historia del sector energético mexicano y el contexto en donde nace la energía geotérmica en México. En palabras del presidente Abelardo L. Rodríguez –quien, en 1933, envió al Congreso la iniciativa para crear la Comisión–, la CFE tendría el propósito explícito de “nacionalizar la generación y distribución de energía eléctrica”.²³³ Cinco años después, el 14 de agosto de 1937, durante el gobierno de

²³¹ José Luis Hernández Galán, *Manuscrito proporcionado por el autor*, 57.

²³² Comisión Federal de Electricidad. “Historia.” Última modificación: Consultado el 1 de octubre de 2024. <https://www.cfe.mx/nuestraempresa/pages/historia.aspx>.

²³³ Este elemento fundacional de la CFE, aunado al artículo 27 constitucional que estipula que la propiedad de las tierras, aguas y recursos naturales del territorio mexicano pertenecen a la nación, es indispensable para entender lo polémico que fue la incorporación de empresas privadas a la comercialización de electricidad en la Reforma Energética del 2013, discusión en la que se ahonda en el siguiente capítulo. Guillermo Rodríguez y Rodríguez, “Evolución de la industria eléctrica en México,” en *El sector eléctrico de México*, ed. Daniel Reséndiz, Estructura Económica y Social de México Los Noventa (México: Fondo de Cultura Económica, 1994), 20.

Lázaro Cárdenas, se inauguró la Comisión y, en 1939, se expidieron la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) y la Ley del Impuesto sobre Consumo de Energía Eléctrica.²³⁴ Sin embargo, el objetivo de la nacionalización no se cumpliría en su totalidad hasta 1960 con la nacionalización de la industria eléctrica.

Desde la fundación de la CFE hasta la nacionalización, la Comisión adquirió paulatinamente la capacidad de generación instalada que no le pertenecía. Para 1960, la CFE ya poseía 54% de la capacidad de generación instalada en el país. El mismo año, durante el gobierno de Adolfo López Mateos, el gobierno compró la totalidad de las propiedades en México de la Impulsora de Empresas Eléctricas y el 90% de las acciones de la *Mexican Light and Power Company*.²³⁵ Con ello se alcanzó la unificación y nacionalización de la industria eléctrica en México. Así, veintitrés años después de la fundación de la Comisión, la nacionalización confirmó al menos dos intenciones vitales de la CFE que quedaron plasmados en la modificación al artículo 27 constitucional. En primer lugar, el gobierno buscó que todos los mexicanos tuvieran acceso a la electricidad. En segundo lugar, las facultades de prestación del servicio público se reservaron exclusivamente al Estado con sustento en razones de beneficio social “y no en motivos de interés particular”.²³⁶ Por consiguiente, dentro de la historia de la CFE, la nacionalización de la industria eléctrica se considera el hecho de mayor relevancia en la evolución de la industria eléctrica mexicana.²³⁷

II. Inicios de la energía geotérmica en México

El inicio de la energía geotérmica en México surgió a finales de los 1940 e inicios de los 1950. Su desarrollo en el país sería inconcebible sin el liderazgo e iniciativa de

²³⁴ *Ibid.*

²³⁵ Hernández Galán, El aprovechamiento del calor de la tierra *Manuscrito proporcionado por el autor*, 58.

²³⁶ Rodríguez y Rodríguez, “Evolución de la industria eléctrica,” 28.

²³⁷ *Ibid.*, 27.

uno de los fundadores de la CFE: Luis F. de Anda.²³⁸ De Anda leyó sobre la planta geotérmica en Larderello, Italia²³⁹ mediante publicaciones técnicas acerca de tema. Al apreciar la naturaleza volcánica de México, pensó que se podría hacer algo similar. Acto seguido, financió por su cuenta un viaje a este lugar para conocer a los ingenieros, científicos y técnicos especializados en geotermia y en su explotación para generar electricidad.²⁴⁰ De vuelta en México, en 1951, De Anda presentó a la CFE un estudio sobre la factibilidad de la generación geotermoeléctrica en el país.²⁴¹ Para 1954, De Anda contó con el apoyo de los directores generales de CFE, Banco de México y el secretario de Economía Nacional para hacer las exploraciones requeridas para evaluar el prospecto geotérmico de México. El costo de las evaluaciones se dividió equitativamente entre CFE y Nacional Financiera (NAFIN).²⁴² También, en 1954, se solicitó asistencia técnica a la Organización de Naciones Unidas (ONU). La ONU mandó a Gunnar Bodvarsson, un especialista geotérmico islandés, para que, de igual manera, evaluara los prospectos geotérmicos en el país. Los resultados de su reporte fomentaron la realización de futuros estudios.²⁴³ El año siguiente, el 30 de junio de 1955, el Banco de México, NAFIN y la CFE firmaron un acuerdo para crear

²³⁸ A pesar del liderazgo de De Anda, otros ingenieros contemporáneos estaban conscientes del potencial geotérmico mexicano. Destaca el geólogo José Isita Septién, cuya tesis profesional (1948) sobre la hidrología de San Bartolomé de Aguascalientes, Guanajuato, señala la posibilidad de utilizar el vapor terrestre como fuente de energía. También está el caso de Vicente Cortés Herrera, quien, en 1951, propuso que se estudiara el aprovechamiento de la geotermia en Ixtlán de los Hervores, Michoacán. Hernández Galán, *Manuscrito proporcionado por el autor*, 58.

²³⁹ La primera planta comercial de energía geotérmica comenzó a operar en 1914 en Italia. Por consiguiente, las primeras investigaciones y formación profesional especializada en geotermia sucedieron ahí. En consecuencia, los siguientes países interesados en explotar el recurso –Estados Unidos, Nueva Zelanda y México– basaron sus primeros proyectos geotérmicos en el expertise italiano. Ronald DiPippo, “Pathé geothermal power plant, Hidalgo, Mexico: A comprehensive retrospective assessment of the first plant of its kind in the Americas,” *Geothermics* 98, (2022): 5.

²⁴⁰ DiPippo, “Pathé Geothermal Power Plant,” 5.

²⁴¹ Hernández Galán, *Manuscrito proporcionado por el autor*, 58. Para facilitar el análisis de la historia de la geotermia, se toma el estudio de factibilidad de la generación geotérmica como año de inicio de esta primera etapa. No obstante, esta designación no limita los hechos relevantes para la geotermia en México a todo aquello sucedido después de 1951.

²⁴² DiPippo, “Pathé Geothermal Power Plant,” 5.

²⁴³ *Ibid.*

la Comisión de Energía Geotérmica (CEG), un organismo semi independiente dentro del esquema de CFE, del cual De Anda se convirtió en su primer presidente.²⁴⁴

III. Pathé, Hidalgo: la primera planta comercial de energía geotérmica en América

Una vez establecida dentro de CFE la estructura institucional encargada de la geotermia, las actividades para construir una planta piloto comenzaron. Se escogió el sitio de Pathé, Hidalgo, a unos cientos de metros de la frontera con Querétaro. Naturalmente, la CFE no tenía experiencia en la construcción de plantas geotérmicas. Por lo tanto, dos empresas fueron cruciales para la construcción de Pathé –y para el desarrollo temprano de la geotermia–: *Larderello Company* y Pemex. Por un lado, el diseño fue asesorado e influenciado por *Larderello Company*.²⁴⁵ En esos momentos México no producía las piezas para la generación geotermoeléctrica e Italia se encontraba en un proceso de actualización de equipos de sus plantas. Por lo tanto, México le compró a Italia una turbina no condensadora²⁴⁶ que le sobraba. Su instalación sirvió para corroborar el buen funcionamiento de Pathé y la posibilidad de energía geotérmica en México. Por otro lado, dada la semejanza entre la perforación de pozos petroleros y pozos geotérmicos, Pemex apoyó a CFE con el equipo de perforación necesario y, en general, con la tecnología de perforación.²⁴⁷ Gracias a ello,

²⁴⁴ *Ibid.*

²⁴⁵ Los años subsecuentes acogieron una etapa de cooperación constante entre Italia y México, específicamente, entre la CFE y *Larderello Company*, en los temas que ya se mencionaron: asistencia técnica, formación de personal y evaluaciones geotérmicas.

²⁴⁶ La turbina no condensadora es un tipo de turbina que no condensa el vapor utilizado para que se aproveche para más generación de electricidad o, en su defecto, para otros usos geotérmicos. Al no ser condensadora, más de la mitad del vapor se desperdiciaba a la atmósfera, lo que caracterizó a Pathé como una planta muy ineficiente. Exitosa al ser pionera de la generación geotermoeléctrica en México y América, pero ineficiente. Como se discute más adelante, la ineficiencia de la planta fue una de las razones por las que se optó por parar sus operaciones en 1973, en lugar de optimizar el equipo y generación de la planta.

²⁴⁷ Entrevista C, 18 de septiembre de 2024.

el primer pozo de Pathé se perforó exitosamente en 1955. Sin embargo, no fue hasta el 20 de noviembre de 1959 que se inauguró la planta y oficialmente comenzó la geotermia en México y la geotermia comercial en América.²⁴⁸

IV. El despegue de la geotermia mexicana y sus años de auge

El éxito de Pathé en demostrar la factibilidad de la energía geotérmica en el país es de inmensa importancia: no sólo desbloqueó una nueva tecnología de generación eléctrica en el país, sino que sentó el precedente para la formación de los ingenieros mexicanos que, más tarde, conformaron los cuadros técnicos que condujeron el desarrollo de la geotermia en México.²⁴⁹ Además, después de que iniciaron las excavaciones en Pathé, la CEG ordenó hacer un inventario nacional del potencial geotérmico del país. Se dirigió a los gobernadores de las entidades para que le presentaran propuestas de sitios con manifestaciones termales en su estado.²⁵⁰ Un sitio que llamó particularmente la atención fue Cerro Prieto, Baja California. El entonces gobernador bajacaliforniano, Braulio Maldonado, reportó el descubrimiento de aguas termales cerca del volcán homónimo al sitio. Los estudios de exploración correspondientes iniciaron en 1958 y el primer pozo se perforó en junio del mismo año. Una vez iniciadas las actividades exploratorias en Cerro Prieto, en 1961, la CFE comenzó a invertir en mayores estudios geológicos y geofísicos para determinar la principal zona del yacimiento y expandir la planta geotérmica hacia allí.²⁵¹ Años más tarde se apreciaron los resultados de estas exploraciones: a la fecha, Cerro Prieto es

²⁴⁸ Pathé tiene la reputación de ser la primera planta geotérmica en América. Sin embargo, es importante puntualizar que fue la primera planta comercial del continente y no quitarle el crédito a un hotel en Los Geysers, California que en 1958 explotó energía geotérmica para su autoconsumo. Hernández Galán, *Manuscrito proporcionado por el autor*.

²⁴⁹ Hernández Galán, *Manuscrito proporcionado por el autor*, 60.

²⁵⁰ *Ibid.*, 60, 61.

²⁵¹ *Ibid.*, 61.

una de las plantas geotérmicas con más capacidad instalada del mundo: en 2021 ocupó el tercer lugar con una capacidad instalada de 720 MW, después de Los Geysers, EEUU y Larderello, Italia, con una capacidad de 900 MW y 769 MW, respectivamente.²⁵²

El éxito de Pathé, los pronósticos prometedores de Cerro Prieto y el creciente repertorio de posibles yacimientos para explotar hicieron que los directivos de la CFE, incluido Luis de Anda, se plantearan los pasos a seguir dentro de la Comisión para expandir el aprovechamiento de los recursos geotérmicos mexicanos. En específico, la CFE concluyó que debía robustecer a su cuerpo de técnicos geotérmicos para, en un futuro, poder operar varias unidades geotérmicas de tamaño importante.²⁵³ Se tomaron dos acciones inmediatas para alcanzar este objetivo. En primer lugar, nuevamente, la CFE solicitó apoyo a Naciones Unidas, quienes enviaron al ingeniero Christopher Armstead para evaluar el panorama mexicano y para presentarle a la CFE los desarrollos de la planta Wairakei, en Nueva Zelanda, dado el mayor parecido del campo neozelandés a los mexicanos, a comparación de los italianos. En segundo lugar, a partir del reportaje de Armstead, Manuel Moreno Torres, director de la CFE, decidió mandar a un grupo de mexicanos a Nueva Zelanda para familiarizarse con sus métodos de manejo y operación de plantas. Al regresar a México, ciertos miembros del grupo se convirtieron en los próximos líderes del desarrollo de la geotermia en el país.²⁵⁴ Destacan Jorge Guiza, Héctor Alonso y Guillermo Fernández de la Garza. Guiza regresó a dirigir el Departamento de Ingeniería Química y Geotermia dentro de la CEG. Cuando, en 1971, desapareció la CEG para convertirse en el Departamento de Geotermia de CFE, Guiza fue quien encabezó el organismo. Fernández de la Garza

²⁵² Statista, "Largest Geothermal Complexes Worldwide as of 2023, by Size," consultado el 18 de noviembre de 2024, <https://www.statista.com/statistics/525206/geothermal-complexes-worldwide-by-size/>.

²⁵³ Hernández Galán, *Manuscrito proporcionado por el autor*, 61.

²⁵⁴ *Ibid.*, 61.

se convirtió en director ejecutivo del IIE, fundado en 1975. Héctor Alonso, por su lado, supervisó la perforación continua de Cerro Prieto, se convirtió en el primer jefe de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la CFE –creada a inicios de los 1980– e incluso formó parte del grupo de trabajo internacional que fundó la Asociación Internacional de Geotermia.²⁵⁵

Décadas más tarde, la CFE mantuvo su prioridad de formar a su personal con vista a tener autosuficiencia en sus recursos humanos geotérmicos. La tendencia se respetó hasta inicios del siglo XXI. Durante la gerencia de la GPG de Gerardo Hiriart (1993 - 2003) se apoyó la mayor cantidad de personas para que estudiaran en el extranjero para continuar su especialización en geotermia y luego regresaran a trabajar en CFE.²⁵⁶ Con el paso de los años, se debilitó el esfuerzo de capacitación profesional nacional y, poco a poco, los especialistas en geotermia de CFE se han jubilado sin que este proceso se acompañe con esfuerzos significativos de actualización de personal. En pocas palabras, no se han retomado los esfuerzos por falta de dinero para capacitar gente.²⁵⁷ Además, un antiguo Gerente de Proyectos Geotermoeléctricos explica que el auge en capacitación a finales de siglo XX se acompañó de proyectos de colaboración entre la CFE y el DOE estadounidense. Con el fin de la colaboración, aunada a la falta de dinero, México dejó de ser tercer lugar en capacidad instalada; por lo tanto la actualización de personal se redujo sustancialmente.²⁵⁸

Otro componente del auge fue la tecnología nacional. A la par de la construcción de un cuerpo de capital humano especializado en geotermia, México comenzó a desarrollar su propia tecnología para la industria geotermoeléctrica e

²⁵⁵ Luis C.A. Gutiérrez-Negrín y Marcelo J. Lippmann, “México: En Memoria de Héctor Alonso Espinosa”, *Revista Geotermia*, vol. 30, no. 2, (2017): 45.

²⁵⁶ Entrevista J, 6 de enero de 2025.

²⁵⁷ *Ibid.*

²⁵⁸ *Ibid.*

incluso logró un 100% de integración nacional en sus proyectos geotérmicos.²⁵⁹ La integración nacional consiste en que todos los componentes de los proyectos, sean tecnológicos, operativos o de recursos humanos, entre otros, se produzcan y ejecuten a nivel nacional. Puesto que México estuvo entre los pioneros de la geotermia a nivel mundial, la tecnología geotérmica que poseía el país era “de punta”.²⁶⁰ A modo de ejemplo, las turbinas geotérmicas se producían en Michoacán. En particular, la empresa Alstom tenía una fábrica en Morelia.²⁶¹

V. El parteaguas de 1973

El año 1973 marcó un parteaguas en la historia de la energía geotérmica, tanto por decisiones directamente relacionadas a la geotermia como por el impacto de las alteraciones petroleras a nivel mundial y nacional en la política energética mexicana, incluido el brazo de la geotermia.

Por un lado, enlazado a la geotermia, la inauguración de la planta Cerro Prieto marcó un hito en el desarrollo geotérmico en México. El potencial de Cerro Prieto aunado al repertorio de manifestaciones termales esparcidas por el territorio nacional con posibles yacimientos y a la ineficiencia de la planta en Pathé hizo que se decidiera frenar las operaciones en Pathé. A fin de cuentas, se había cumplido su objetivo de comprobar a la geotermia como una fuente de electricidad para México. En consecuencia, Cerro Prieto quedó como la única planta en operación durante nueve años, hasta la apertura de Los Azufres, Michoacán, en 1982. Años más tarde se incorporaron a la producción geotérmica las plantas de Los Humeros, Puebla, y Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, en 1990 y 2001, respectivamente.

²⁵⁹ Entrevista L, 10 de enero de 2025.

²⁶⁰ Entrevista E, 25 de septiembre de 2024.

²⁶¹ Entrevista L, 10 de enero de 2025.

Cerro Prieto también representó un punto de colaboración internacional con el DOE estadounidense. Hubo al menos dos acuerdos de colaboración entre CFE y el DOE para desarrollo tecnológico en geotermia. El primero se firmó el 21 de julio de 1977 y duró cinco años.²⁶² En base a sus buenos resultados, el 7 de abril de 1986 se firmó un segundo acuerdo. Ambos acuerdos se basaron en los compromisos alcanzados por la Comisión Mixta de EEUU y México sobre Cooperación Científica y Técnica, que se estableció en 1976. La Comisión determinó a la energía geotérmica como un área de cooperación.

En conjunto, Cerro Prieto, Los Azufres, Los Humeros y Las Tres Vírgenes completaron las plantas que construyó la CFE y operan hasta el presente. Existe un quinto campo geotérmico que, desde los años ochenta, cuenta con los permisos para construir una planta. Sin embargo, el proyecto se frenó por oposición social. Es el caso de Cerrito Colorado, Jalisco, que se discutirá más adelante.

Por otro lado, el alza en los precios petroleros en 1973 y los descubrimientos de yacimientos de crudo en territorio nacional suscitaron una serie de decisiones políticas que, al priorizar al petróleo, desplazaron recursos y atención de otras fuentes energéticas, tales como la geotermia. En la siguiente sección se ahonda en estos puntos. Sin embargo, antes de continuar, se abstraen algunas conclusiones del desarrollo temprano de la geotermia en México.

VI. La geotermia mexicana del siglo XX en contexto

Los inicios del desarrollo de la energía geotérmica en México se caracterizaron por una combinación de liderazgos personales, cooperación internacional, exploración de recursos, construcción institucional, novedad en torno a la fuente de energía y

²⁶² DOE y CFE, *Agreement Between The Department of Energy of the United States of America and The Comisión Federal de Electricidad of the Mexican United States in the Field of Geothermal Energy*, 1986, p. 1.

concordancia con los dos principios fundacionales de la CFE que se discutieron anteriormente. La curiosidad y el liderazgo inicial de Luis de Anda y sus excursiones a Larderello fueron clave para el interés de la CFE en la geotermia. De igual manera, el papel de De Anda es un ejemplo de ‘agente emprendedor’ para escapar del *carbon lock-in* en el sentido de que impulsó activamente un cambio para desarrollar un tipo de tecnología distinto a las convencionales. Además, las conexiones que De Anda construyó con sus contrapartes italianos fomentaron la cooperación constante entre la Comisión y *Larderello Company*. Las cuales, aunadas a las consultas que se solicitaron a Naciones Unidas y a la cooperación con el DOE de EEUU, se integran a un conjunto de acercamientos internacionales con el propósito de formar al cuerpo de técnicos geotérmicos mexicanos, evaluar el potencial geotérmico del país y optimizar el funcionamiento de las plantas.²⁶³ Las evaluaciones del potencial geotérmico producto de dichas colaboraciones junto las realizadas directamente por la CFE permitieron demostrar suficientes prospectos geotérmicos en México para impulsar la construcción institucional especializada en geotermia. Concretamente: la Comisión de Energía Geotérmica que después se convirtió en el Departamento de Geotermia de la CFE y posteriormente, a inicios de los 1980s en la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, una de las pocas agencias descentralizadas que tiene la CFE hasta la fecha.²⁶⁴

Otro elemento a resaltar a partir de las evaluaciones de potencial fue la exclusividad relativa de México frente a otras partes del mundo para explotar la geotermia. Es decir, el potencial geotérmico mexicano dotó al país con la posibilidad de explotar un recurso que otros Estados, sencillamente, no podían. Ahora bien, este

²⁶³ La cooperación internacional se volvió una constante para la geotermia mexicana. En distintas instancias, por ejemplo, el *Department of Energy* de los EEUU se acercó al IIE para consultas geotérmicas.

²⁶⁴ Entrevista B, 12 de septiembre de 2024.

punto, visto en conjunto con los objetivos fundacionales de la CFE –satisfacer la demanda energética y nacionalizar la generación y distribución de electricidad–, además de la coincidencia temporal de la nacionalización de la industria eléctrica (1960) y la inauguración de Pathé (1959), sugieren que se le pudo haber asociado una connotación nacionalista a la geotermia mexicana. “Esa era la idea de De Anda”,²⁶⁵ comentó un ingeniero que, con una larga carrera en el IEE y en la CFE, conoció y trabajó con De Anda y sus allegados.

Sin embargo, a pesar de su potencial de explotación y su potencial de involucrarse en una narrativa nacionalista –o en lo que hoy se entiende como soberanía energética– en esos momentos la geotermia sólo se valoraba como una fuente de energía entre otras más. No obstante, el precedente de sentimientos nacionalistas alrededor del aprovechamiento geotérmico puede ser positivo en caso de, a futuro, redefinir a la geotermia como mecanismo de soberanía energética.

En esta etapa, la geotermia no se valoraba por sus ventajas comparativas frente a otras fuentes de energía, menos frente a otras renovables. Las preocupaciones ambientales y climáticas en donde puede encajar la geotermia en el presente no se tenían –ni se comenzaban a considerar– y, como dijo un exfuncionario de la CFE:

“Había poco entendimiento de qué es la geotermia, cómo desarrollarla y los impactos colaterales que trae, no solamente para la generación de energía eléctrica, sino [por] los impactos colaterales que tiene para el desarrollo social, empleos, ambiente y muchas otras cosas que tiene a favor la geotermia.”²⁶⁶

Entonces, a pesar del buen comienzo que tuvo la geotermia en México, con un potencial prometedor, un buen cuerpo de recursos humanos y “tecnología de punta”²⁶⁷, en los 1970 se adueñó del escenario otro recurso energético que: 1)

²⁶⁵ Entrevista C, 18 de septiembre de 2024.

²⁶⁶ Entrevista E, 25 de septiembre de 2024.

²⁶⁷ *Ibid.*

satisfacía –y continuaba– la narrativa energética nacionalista, 2) contribuía, de manera auspiciosa, a satisfacer la demanda energética y, además, 3) era comercializable: el petróleo.

VII. Pemex y la geotermia

Como se discutió en el capítulo anterior, el petróleo tiene un valor –simbólico y económico– sustancial en la historia de la construcción y reafirmación estatal de México. Sobre todo, desde la nacionalización petrolera de 1938 hasta inicios de los setenta, representó una “pieza central en la industrialización del país”, un “pilar del proyecto de desarrollo por sustitución de importaciones” y logró darle autosuficiencia energética al país con energía a bajos costos.²⁶⁸ Dado el peso del petróleo para el desarrollo y la matriz energética, es pertinente analizar los alcances –intencionados y no intencionados– que su industria tuvo en otras fuentes de energía. Además, el petróleo y la geotermia tienen una interconexión histórica particular: Pemex ayudó a impulsar los inicios de la geotermia en México. Gracias a las semejanzas tecnológicas entre ambas industrias, en particular en la perforación de pozos, Pemex cooperó con CFE para arrancar la explotación geotérmica. Los pozos geotérmicos de CFE, tanto exploratorios así como los que se explotaron, se perforaron con equipos petroleros. Esto marca un precedente valioso al momento de considerar la posibilidad de una mayor colaboración entre ambas industrias. No obstante, históricamente las primeras etapas del desarrollo geotérmico en México le deben su impulso a Pemex. En palabras de una experta en geotermia, es comúnmente pensado que “la geotermia nació del petróleo”.²⁶⁹

²⁶⁸ Isabelle Rousseau, “La renovación institucional en el sector hidrocarburos y el desarrollo industrial: un balance de la Reforma Energética 2013-2014,” en *Reforma Energética y Desarrollo Industrial*, coord. Arturo Oropeza García (México D.F.: UNAM, 2015), 52.

²⁶⁹ Entrevista I, 29 de septiembre de 2024.

Ahora bien, los años en el que la geotermia mexicana despegó, también acogieron un evento indispensable para comprender la historia del sector energético mexicano –y del país–: el descubrimiento de nuevos yacimientos petroleros en el sureste del país a inicios de los 1970. Durante esos años, en términos más amplios, México se enfrentaba a retos económicos derivados del agotamiento del modelo de desarrollo basado en la sustitución de importaciones. Al mismo tiempo, en el ámbito petrolero, México se había convertido en país importador. Entonces, los descubrimientos petroleros en territorio nacional aunado al aumento de los precios del crudo a finales de 1973 –de 3 a 11.64 US\$/b–²⁷⁰ a causa del embargo petrolero en respuesta a la guerra del Kippur, le brindaron a México una posición vital para expandir su industria petrolera. A continuación, se desarrollan estos puntos para comprender su magnitud en la política energética nacional y, particularmente, su impacto en la geotermia mexicana.

El sexenio de Luis Echeverría Álvarez presenció y –como sugiere la académica Isabelle Rousseau– “quizás alentó”²⁷¹ la crisis del modelo de sustitución de importaciones. Echeverría recurrió al gasto público para reavivar la economía. La medida funcionó en un inicio, empero, su mala administración provocó que pronto se alcanzara un déficit público equivalente al 5.7% del Producto Interno Bruto.²⁷² Esto, aunado al efecto ahuyentador de su retórica populista, provocó que la comunidad de negocios perdiera confianza en el gobierno y las reservas internacionales huyeron del país. En consiguiente, el 1 de septiembre de 1976 se decretó la devaluación del peso. México buscó apoyo en el Fondo Monetario Internacional y se alineó a las condiciones que le fijó el organismo internacional.²⁷³

²⁷⁰ Isabelle Rousseau, *Tribulaciones de dos empresas petroleras estatales, 1900-2014: trayectorias comparadas de PEMEX y PdVSA*, Primera edición (2017), 250.

²⁷¹ Rousseau, *Tribulaciones de dos empresas petroleras*, 2017, 260.

²⁷² *Ibid.*

²⁷³ *Ibid.*

José López Portillo llegó a la presidencia en medio de este complejo escenario. Al heredar los problemas económicos de Echeverría, López Portillo encontró refugio en el petróleo de la nación. Erigió la aspiración de un México líder en exportaciones petroleras desde su campaña electoral.²⁷⁴ Bajo esta línea, una vez en la presidencia, el petróleo se convirtió en un elemento estratégico para impulsar el desarrollo del país y cumplir con los requisitos del FMI. La estrategia de desarrollo nacional con el petróleo como núcleo implicó grandes inversiones. A modo de ejemplo, en 1972 Pemex invirtió un total de 468.9 millones de dólares en total, repartidos entre sus distintos sectores,²⁷⁵ mientras que para 1978 la suma alcanzó 2,905.1 millones de dólares. Esto representó un incremento de poco más de seis veces las inversiones de 1972. Sin embargo, fue a finales de los 1970 e inicios de los 1980 cuando la política petrolera tuvo una fase de expansión “sin precedentes” con el crecimiento del monto de reservas, el volumen de producción y el de exportación.²⁷⁶ En 1978, Pemex anunció una inversión de capital de 44 mil millones de dólares –la más grande en su historia– para aumentar las exportaciones.²⁷⁷ Esto implicó construir velozmente una infraestructura de producción y refinación.²⁷⁸ El crecimiento incrementó los ingresos de Pemex. Sin embargo, los gastos públicos y la deuda crecieron al mismo tiempo. En 1982, la depreciación internacional del crudo en conjunto con un mal manejo en ventas y la dependencia de la economía nacional al petróleo colocaron al país en una situación económica crítica, totalmente distinta a la “administración de la abundancia”.²⁷⁹

²⁷⁴ *Ibid.*, 262.

²⁷⁵ Los sectores que incluye la cifra son: exploración, perforación para exploración, perforación para desarrollo, producción, refinación, petroquímica, transporte y comercialización y “otros”. Georges Philip, en Rousseau, 251.

²⁷⁶ Rousseau, *Tribulaciones de dos empresas petroleras*, 2017, 277.

²⁷⁷ *Ibid.*, 282.

²⁷⁸ *Ibid.*

²⁷⁹ *Ibid.*, 290. Es importante recordar que, a pesar de que la crisis económica de 1982 es indisoluble del manejo petrolero los años precedentes, la crisis evidenció debilidades estructurales de la economía mexicana, por lo que no se le puede atribuir el fallo exclusivamente a la política petrolera.

Las enormes inversiones en el sector petrolero encaminaron a México en la trayectoria de tener que darle uso y mantenimiento a toda la infraestructura que se construyó alrededor del energético. Para el *carbon lock-in*, este es un momento ejemplar de fijación de un complejo tecno institucional con el petróleo en el centro del sector energético. Esto desplazó las posibles inversiones y mantenimiento de recursos humanos asociados a otras energías, en este caso, asociado a la geotermia. Similarmente, el grueso de la atención y el financiamiento disponible para la política energética orbitó alrededor del petróleo y desplazó los otros posibles desarrollos de fuentes alternativas de energía, entre ellas; otra consecuencia del *carbon lock-in* mexicano. Otro efecto del *carbon lock-in* fue que, por falta de atención a la geotermia, se dejó de priorizar la formación técnica de ingenieros mexicanos y también se dejó de invertir en la innovación tecnológica requerida para la industria, lo que ha tenido repercusiones para el desarrollo posterior de la tecnología. En palabras de un profesional en el área que se formó durante los 1970:

“México adquirió este potencial de riqueza de gas y petróleo y se olvidó de la geotermia, se olvidó de la creación del recurso humano [sic]. Ahora se le acaba el petróleo, tiene que importar petróleo y [necesita] recurso humano para generar geotermia y no lo tiene, no está. [...] y es más costoso porque se tiene que importar tecnología [...] que antes se generaba [en México] y se exportaba, ahora se importa.”²⁸⁰

Ahora bien, en ninguna medida se frenó la geotermia durante esta época, simplemente, la magnitud con la que se invirtió en ella disminuyó paulatinamente y poco a poco se estancó su desarrollo.

Además, tampoco se puede considerar a los choques petroleros como el único obstáculo en el desarrollo geotérmico en el país, pues como se discute a continuación

²⁸⁰ Entrevista E., 25 de septiembre de 2024.

con el caso de Cerrito Colorado –o La Primavera–, la geotermia empezó a enfrentar problemas de aceptación social, al grado de frenar el desarrollo de una planta.

VIII. Cerrito Colorado: una piedra en el zapato de la geotermia

En el siglo XX, México identificó seis yacimientos geotérmicos con utilidad garantizada²⁸¹ para la generación de energía geotérmica: Pathé, Cerro Prieto, La Primavera, Los Azufres, Los Humeros y Las Tres Vírgenes. Cabe resaltar que todos los sitios tenían manifestaciones geotérmicas muy accesibles, en palabras de un ingeniero: “a flor de tierra”²⁸². Asimismo, en todos los sitios se logró inaugurar una planta menos en La Primavera. Como se desarrolla a continuación, esto no se debió a dificultades técnicas asociadas al yacimiento, sino a la oposición social en contra del proyecto, motivada por preocupaciones ambientales, a pesar de tratarse de una energía renovable y beneficios ambientales que traería la planta, tanto para la oferta eléctrica como en dimensiones ecológicas.

La Primavera se encuentra dentro del bosque homónimo, cerca de Guadalajara, Jalisco. Cerrito Colorado es el nombre de la planta que se planeó construir en el sitio, nombre con el que el caso es popularmente conocido. La CFE comenzó a estudiar el sitio en los 1960 y excavó el primer pozo exploratorio en 1980. Posteriormente, entre 1980 y 1988, excavó otros once pozos. Las excavaciones exploratorias confirmaron un potencial de 75 MW, lo que representaba en ese entonces casi 50% de la demanda energética de Guadalajara.²⁸³ La oposición social al

²⁸¹ Recordemos que la existencia de manifestaciones termales o la identificación de yacimientos geotérmicos por sí sola no garantiza que, una vez excavados los pozos, el yacimiento –en específico: sus fluidos o vapor– pueda explotarse para generar electricidad. Éste es uno de los factores de incertidumbre de la geotermia que, como ya se estipuló, hace menos atractiva a la geotermia para su inversión.

²⁸² Entrevista E., 25 de septiembre de 2024.

²⁸³ Entrevista B, 11 de septiembre de 2024.

proyecto comenzó por la visibilidad del daño que ocasionó la construcción del sitio. La CFE construyó caminos de acceso que, dada la cercanía del bosque a Guadalajara, comenzaron a ser visibles desde la ciudad. En otras palabras, la deforestación requerida para construir los caminos comenzó a ser visible. Empezó a haber inquietud por parte de la Federación de Estudiantes de la Universidad de Guadalajara, en ese entonces liderada por Tonatiuh Bravo Padilla, quien empezó a pedir que se detuviera la obra.²⁸⁴ Ante las solicitudes, la CFE organizó pláticas con los estudiantes para llegar a acuerdos, en las que la CFE también presentó beneficios ecológicos que traería la planta. Por ejemplo, el bosque padece temporadas de incendios forestales y, dada la localización de la planta, la CFE ofreció sus servicios para reportar incendios y que se pudieran atender con más prontitud. No obstante, los beneficios ambientales que se argumentaron no incluyeron las pocas emisiones de la geotermia ni mucho menos su contribución a la mitigación climática, pues estas preocupaciones se difundieron hasta años después tanto en círculos gubernamentales, así como sociales.²⁸⁵

La Comisión también cometió grandes omisiones y errores en términos ambientales. Es cierto que, en ese entonces, no se tenían las precauciones ambientales que imperan en el presente; sin embargo, una “solución” que se implementó para evitar la visibilidad del daño de los caminos hacia el yacimiento fue que se esparció pintura verde en los tramos deforestados, con el objetivo de que no se viera desde Guadalajara.²⁸⁶ La acción sólo generó más oposición e indignación hacia la planta

²⁸⁴ *Ibid.*

²⁸⁵ El efecto invernadero se conoció en círculos científicos desde la década de los 1960 y 1970. Sin embargo, no fue hasta finales de los 1980 e inicios de los 1990 que se reconoció en la esfera internacional al cambio climático como una amenaza. Destaca su mención en el Congreso Mundial Meteorológico de 1987, donde se estipuló oficialmente que la concentración de gases efecto invernadero incrementa la temperatura de la atmósfera baja. United Nations, *Yearbook of the United Nations 1987*, Chapter 13, consultado el 11 de octubre de 2024, https://cdn.un.org/unyearbook/yun/chapter_pdf/1987YUN/1987_P2_CH13.pdf.

²⁸⁶ Entrevista D, 19 de septiembre de 2024.

geotérmica, aunado a otras razones: en marzo de 1989 el gobierno estatal de Jalisco le solicitó a la CFE que suspendiera todas sus actividades en La Primavera y realizara trabajos de restauración ecológica en la zona.²⁸⁷

El caso de Cerrito Colorado es interesante porque evidencia: 1) la evolución de preocupaciones ambientales de la época y 2) cómo se percibía la energía geotérmica en relación a sus impactos ecológicos. No se tenían presentes sus beneficios climáticos; al menos no se tenían presentes en la CFE ni en la sociedad mexicana. Sí existen publicaciones académicas contemporáneas que abogan a favor de la geotermia por estos beneficios. Destaca el libro *Geothermal energy: Its past, present, and future contributions to the energy needs of man* escrito por Christopher Armstead en 1978, uno de los ingenieros que dio consultas técnicas a México. La dedicatoria de su obra plasma sus preocupaciones ambientales y muestra que el autor considera que la geotermia puede contribuir positivamente a la mitigación del deterioro ambiental:

*“To all those who feel profound unease at the profligate squandering of the earth's dwindling resources and at the wanton fouling of our once beautiful planet this book is dedicated, in the hope that it may at least contribute to the solution of one of the grave crises confronting Mankind - that of finding abundant energy and of simultaneously reducing the terrifying degree of pollution associated with the combustion of huge quantities of fossil fuels on which we are now so dependent for our social needs.”*²⁸⁸

Después de la cancelación de la planta Cerrito Colorado, se ha intentado reactivar el proyecto, sin resultados positivos. En caso de retomarse, se tendría que dar mantenimiento a los pozos para restaurar su producción, lo que implica inversiones

²⁸⁷ Luis C. A. Gutiérrez-Negrin, Germin R. Ramírez-Silva, Mario Martínez-Máñez, and Carlos López-López, "Hydrographic Characterization of the La Primavera, Mexico, Geothermal Field," *Geothermal Resources Council Transactions* 26 (2002): 17-19.

²⁸⁸ H. Christopher H. Armstead, *Geothermal Energy: Its Past, Present, and Future Contributions to the Energy Needs of Man* (Londres: Halsted Press, 1978), s.p.

adicionales. Por lo pronto, apenas unos años después de la cancelación de La Primavera, el cambio climático se convirtió en una preocupación internacional y un problema a resolver, donde la quema de combustibles fósiles se posicionó como fuente del problema. Por lo tanto, la geotermia comenzó a tener un valor agregado. En la siguiente sección se ahonda al respecto.

IX. 1990: El cambio climático entra a las preocupaciones ambientales de la época

A escala internacional, en 1992 se celebró en Río de Janeiro la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. El evento marcó el comienzo del régimen internacional de mitigación del cambio climático e inició el proceso de construcción de acuerdos que las partes firmantes de la Convención –los Estados– se comprometieron a cumplir. México forma parte de la CMNUCC desde su inicio: el cambio climático entró a la esfera de preocupaciones de la política exterior mexicana. Lo cual no necesariamente implica que también se tuviera la inquietud climática en la política doméstica del país. Sin embargo, en base a una publicación de la CFE de 1994, se puede apreciar que la Comisión –al menos oficialmente– sí estaba al tanto de los efectos adversos del efecto invernadero y que, en consecuencia, fomentar la generación eléctrica a partir de fuentes no fósiles se consideraba benéfico.

La publicación de la CFE referida es un capítulo titulado “Aspectos ambientales de la evaluación y manejo de proyectos eléctricos”, escrito por el ingeniero y académico Daniel Reséndiz-Núñez, del libro “El sector eléctrico de México”, publicado por la CFE y el Fondo de Cultura Económica en 1994. En la sección de preocupaciones ambientales de la época, el autor reconoce que:

“La evaluación de las operaciones para el crecimiento del sector eléctrico y las políticas y prácticas de operación de sus instalaciones tienen que hacerse en el contexto de las preocupaciones ecológicas de la época, tanto locales como globales...”²⁸⁹

A partir de ahí enuncia comprensivamente una serie de problemas ambientales contemporáneos, entre ellos: contaminación de los océanos, escasez agua potable, bosques y selvas bajo riesgo, entre otros. Llama la atención que reconoce a los bosques y selvas como reguladores naturales de clima; además, en la lista incluye al efecto invernadero y, al explicarlo, identifica a los proyectos termoeléctricos como una de las principales fuentes de gases efecto invernadero.²⁹⁰ Esto significa un reconocimiento implícito de las ventajas de las energías renovables. Sin embargo, lo hace explícito y, en el proceso, distingue que la geotermia es una fuente de energía competitiva:

“A la luz de [las preocupaciones ecológicas de la época], y sin obviar la necesidad de que cada proyecto de generación eléctrica se evalúe en cuanto a sus efectos específicos, puede decirse que los basados en energías primarias renovables tienen ventajas ambientales. Sin embargo, *con excepción de la hidroelectricidad y la geotermia*²⁹¹, las energías renovables todavía requieren avances tecnológicos grandes para competir en precio con las otras formas de energía primaria.”²⁹²

En suma, el capítulo menciona ventajas de la energía geotérmica sobre la basada en combustión. Éstas son: 1) es renovable, 2) sus efectos ambientales son controlables a costos moderados, 3) en México se domina la ingeniería geotérmica, 4) es equivalente a un seguro contra riesgos altos de costos futuros –económicos y ecológicos– de la

²⁸⁹ Daniel Reséndiz-Núñez, “Aspectos ambientales de la evaluación y manejo de proyectos eléctricos,” en *El sector eléctrico de México*, ed. Daniel Reséndiz, Estructura Económica y Social de México Los Noventa (México: Fondo de Cultura Económica, 1994), 150.

²⁹⁰ *Ibid.*

²⁹¹ Itálicas propias para enfatizar.

²⁹² Reséndiz-Núñez, “Aspectos ambientales,” 151.

quema de combustibles fósiles.²⁹³ Con esto se confirma que, para los 1990, a la geotermia ya se le reconocen beneficios climáticos, también dentro de la CFE. Sin embargo, no será hasta el siglo XXI que se comience a fomentar y justificar el desarrollo de la geotermia por sus beneficios ambientales.

X. La geotermia en la primera década del siglo XXI

Para inicios del siglo XXI ya estaban en operación las cuatro plantas geotérmicas de la CFE que siguen activas en el presente: Cerro Prieto, Los Azufres, Los Humeros y Las Tres Vírgenes. A partir de entonces, el desarrollo nacional de la geotermia se enfocó en el mantenimiento, en la eficiencia de las plantas existentes y en la expansión de su producción. No hubo nuevas construcciones, empero, sí se realizaron exploraciones para posibles plantas a futuro. A continuación, se exhiben datos de la capacidad instalada de geotermia en 2011, al igual que la capacidad instalada del total de generación eléctrica en el país y los proyectos de exploración a futuro.

<i>Tabla 7. Capacidad geotérmica neta instalada 2010²⁹⁴</i>	
Planta	Capacidad instalada (MW)
Cerro Prieto	720
Los Azufres	188
Los Humeros	40
Las Tres Vírgenes	10
Total	959

²⁹³ Reséndiz-Núñez, 154

²⁹⁴ Elaboración propia, datos de: Magaly Flores-Armenta y Luis C.A. Gutiérrez-Négrin, “Actividad y Desarrollo Geotérmico en México,” presentado en el *Curso Corto sobre Perforación Geotérmica, Desarrollo de Recursos y Plantas de Energía*, organizado por UNU-GTP y LaGeo, Santa Tecla, El Salvador, 16-22 de enero de 2011.

Tabla 8. Capacidad neta instalada por tipo de generación (Septiembre 2010)²⁹⁵		
Tipo de generación	Capacidad efectiva (MW)	Porcentaje
Gas y petróleo	23,474.67	46%
Hidroeléctrica	11,174.90	22%
Carbón	2,600.00	5%
Geotérmica	964.5	2%
Eólica	85.25	0%
Nuclear	1,364.88	3%
Gas y petróleo (privados)	11,906.90	23%
Total	51,571.10	100%

Tabla 9. Capacidad geotérmica en México, con proyectos en construcción y nuevos proyectos (2010)²⁹⁶				
Campo geotérmico	Año de comienzo	Capacidad operativa (MW)	En construcción (MW)	Nuevos proyectos (MW)
Cerro Prieto, BC.	1973	720	-	-
Los Azufres, Mich.	1982	188	-	50
Los Humeros, Pue.	1990	40	2 x 25	2 x 25
Las Tres Vírgenes, BCS.	2001	10	-	-
Cerritos Colorados, Jal.	-	-	-	25

²⁹⁵ Traducción y reproducción de *Table 2: Gross installed capacity by generation type (Sep 2010)* en Flores-Armenta y Gutiérrez-Négrin, "Actividad y Desarrollo Geotérmico," 2011.

²⁹⁶ Traducción y reproducción de *Table 4: Geothermal capacity in Mexico* en Flores-Armenta y Gutiérrez-Négrin, "Actividad y Desarrollo Geotérmico," 2011.

<i>Tabla 10. Proyectos de exploración geotérmica (hasta 2010)²⁹⁷</i>		
Proyecto	Objetivo	Estatus Actual
Cerritos Colorados, Jalisco	Instalar 25 MW en unidad de tipo condensador	EIA aprobado, pero problemas sociales persisten
Aculco, Puebla	Evaluar como proyecto <i>EGS</i>	Dos pozos profundos perforados, ambos son de alta temperatura pero permeabilidad insignificante
Tulecheck, Baja California	Proyecto de ciclo binario	Dos pozos exploratorios en 2010
El Chichonal, Chiapas	Explorar para recursos de alta temperatura	Estudios de exploración en progreso
Tacaná, Chiapas	Explorar para recursos de alta temperatura	Estudios de exploración en progreso
Lago Cuitzeo, Guanajuato	Proyecto de ciclo binario	Estudios de exploración en progreso

Entre las plantas de CFE, Cerro Prieto siempre ha tenido un papel estelar debido a su tamaño, por lo que acapara gran parte de las actividades geotérmicas del país. A nivel nacional, entre 1963 y 2008 se perforaron 556 pozos geotérmicos, incluyendo exploratorios, de producción e inyección. En total 66% de los pozos y 73% de la profundidad combinada se perforó en Cerro Prieto, que también representa 75% de la capacidad instalada y 73% de la generación eléctrica geotérmica nacional.²⁹⁸ Sin embargo, su tamaño no es suficiente para explicar por qué, incluido Cerro Prieto, la CFE se limitó a dar mantenimiento a las plantas y no a expandir la explotación de geotermia en el país. En efecto, a principios de los 1990 México era el tercer país con

²⁹⁷ Traducción y reproducción de *Table 9: Geothermal exploration projects* en Flores-Armenta y Gutiérrez-Négrin, "Actividad y Desarrollo Geotérmico," 2011.

²⁹⁸ *Ibid.*

más capacidad instalada del mundo y ha bajado paulatinamente al séptimo lugar. La teoría del EC ofrece explicaciones, en seguida se exponen.

XI. Los *lock-ins* de la geotermia

Conforme se desarrolló la geotermia en México también se consolidaron algunos *lock-ins* de sendero de la dependencia que limitan su desarrollo. A gran escala, el *carbon lock-in* del sistema energético mexicano la desplazó, como se vio con el caso de los choques petroleros de los 1980. Sin embargo, también hay *lock-ins* de menor escala que la afectan. Quizás el más significativo es el *lock-in* tecno institucional de la energía geotérmica dentro de CFE, que explica parcialmente por qué no hay un aprovechamiento institucionalizado de los usos directos en el país.

La construcción institucional de la geotermia comenzó a formar un *carbon lock-in* y *lock-in* tecnológico de la energía geotérmica dentro de CFE. Por un lado, fue positivo, lógico y necesario para consolidar el desarrollo de la geotermia en México. Las condiciones que resultaron en *lock-ins* en realidad garantizaron que la CFE tuviera personal, equipo y experiencia especializada en energía geotérmica. El *lock-in* tecno institucional se dio alrededor de la energía geotérmica en especial y no alrededor de la geotermia como fuente de energía. El objetivo de la CFE era la generación de electricidad, no otros usos de la geotermia. Por lo tanto, la CFE no sistematizó el aprovechamiento de sus usos directos pues se escapaban de las competencias puramente eléctricas de la Comisión. Sí incorporó, de distintas maneras particulares a cada sitio geotérmico formas de aprovechar los usos directos o subproductos geotérmicos, que representan otra posibilidad de aprovechamiento de las actividades geotérmicas. Sin embargo, los usos directos en las centrales de CFE no

han sido continuos, existen pocos registros y evaluaciones de su desempeño y solían frenarse o trabarse desde CFE por no ser eléctricos. En palabras de un ex funcionario:

“Estas cosas de usos no eléctricos [...] en los Azufres pusimos secadores de madera y también lo manejaba al principio como [para] probar quisimos ponerlo [...]. Primero: [se criticaba] ‘¿Qué hace CFE metido en eso, sino es su función?’ Y es muy desmoralizante porque todo eso uno lo hace con cierto buen corazón o así y ver a la gente que llega la mañana y que les enseñen y con su gorrito para deshidratar fruta y todo eso y después, [critican] [...] y además observaban: [...] ‘¿y por qué gastaron tantos viajes a buscar al técnico? Pero si no es de su...’ y empieza así contra esa batalla y siempre tuvo uno acusados con la Auditoría Superior de la Federación todo era: ‘¿por qué está haciendo eso sino en la función de CFE?’”²⁹⁹

Como se puede apreciar, la CFE tenía muchas inercias institucionales ante la adopción de tecnologías de usos directos. También hay un factor de *lock-in* conductual por el sacrificio personal de la iniciativa de hacer algo distinto y por las críticas que se recibían de los demás.

“Se tiene que tener a alguien que te apoye [en] la dirección y sí, yo preguntaba todo eso, buscaba que no me aventara solo.”³⁰⁰

Incluso con apoyo de otras personas se aprecian mecanismos de protección, por ejemplo:

“... y entonces dicen ponlo como que la Unidad de Apoyo Social lo inscriba como programa, que te proteja.”

En este caso, las protecciones añaden a que no haya un registro concreto de usos directos, pues en el caso mencionado se registraron actividades como parte de la Unidad de Apoyo social. No obstante, esto sugiere a la Unidad como una fuente de investigación para conocer el desarrollo de las aplicaciones directas del país.

²⁹⁹ Entrevista A, 19 de agosto de 2024.

³⁰⁰ *Ibid.*

En recapitulación, la CFE generó un *lock-in* de la energía geotérmica, que dejó un vacío institucional sin nadie que encargarse de los usos directos de manera sistemática. Esto limitó su desarrollo a aplicaciones de balneología, a iniciativas de investigación o educativas o al desarrollo por parte de empresas privadas, también muy limitado y sin una escala considerable. Además, aunque en este momento de la historia no era particularmente relevante, el *lock-in* de la energía geotérmica en CFE tiene consecuencias en el desarrollo privado de geotermoeléctricas. En el próximo capítulo se discute con mayor detalle este caso.

Tabla 11. Lock-ins presentes en la historia del desarrollo geotérmico		
<i>Lock-in</i>	Características	Consecuencias para el desarrollo de la geotermia
<i>Carbon lock-in</i>	<ul style="list-style-type: none"> ● Sector energético mexicano a base de hidrocarburos ● Grandes inversiones en gas y petróleo 	<ul style="list-style-type: none"> ● Desplazamiento de otras tecnologías ● Menos presupuesto para capacitación de personal en geotermia
<i>Lock-in</i> tecno institucional de la energía geotérmica en CFE	<ul style="list-style-type: none"> ● CFE especializada en electricidad ● Presupuesto limitado para actividades eléctricas ● Inercia social ante la iniciativa de implementar cambios 	<ul style="list-style-type: none"> ● Generación de energía geotérmica exclusiva para el Estado ● Vacío institucional de usos directos

Conclusión

Los primeros cincuenta años de la geotermia mexicana dieron lugar a su auge y la consolidaron como una tecnología que la CFE dominó al lograr tener su propio

gremio de profesionales. Sin embargo, a inicios del siglo XXI, su desarrollo se limitó a mantener las plantas existentes sin nuevos proyectos de construcción de plantas u otros modos de aprovechamiento de parte de CFE. Si bien el mantenimiento de las plantas no es poca cosa, el país se quedó con potencial por explotar, incluso en zonas ya exploradas. No obstante, el precedente del auge geotérmico es valioso e importante, e invita a reflexionar qué lecciones se pueden aprender y aplicar a futuro para retomar el desarrollo de la geotermia.

Asimismo, se apreció que el desarrollo se limitó por los efectos del *carbon lock-in* mexicano y del *lock-in* de la energía geotérmica dentro de CFE. Pese a que los *lock-ins* explican parte de los límites de la geotermia, indicarlos también señala que atender para expandir su uso. Por ejemplo, a falta de una institución a cargo de los usos directos, sería interesante implementarla o fomentar modos de aprovechamiento que no dependan totalmente del Estado. Asimismo, la concentración de recursos hacia Pemex desvió la atención de la geotermia. No obstante, también aprendimos que ambas industrias han colaborado y técnicamente, y lo podrían volver a hacer. Como se verá, hacia el presente se han intentado nuevos modos de aprovechamiento geotérmico y la industria ha recibido olas de atención renovada.

Capítulo IV

La ola de la Ley de Energía Geotérmica: intentos de fomento en el siglo XXI

“La geotermia sí fue creciendo y creciendo y de repente ahora se detuvo y no se le aplicó ni un peso y va para abajo y para abajo...”

-Entrevista A, 19 de agosto de 2024.

Introducción

Luego de que despegara y se consolidara la generación de energía geotérmica en el siglo XX, los comienzos del siglo XXI tuvieron cierto estancamiento en cuanto a su desarrollo. La capacidad instalada se modificó mínimamente. Después de Tres Virgenes en Baja California Sur, la CFE no inauguró ninguna planta nueva, sólo se enfocó en mantener las plantas existentes. Sin embargo, iniciada la década del 2010, la historia del desarrollo geotérmico experimentó una nueva etapa de proactividad porque surgieron diversos instrumentos para su promoción: legislativos, financieros, de investigación y fiscales. Quizás el más relevante –de cierta manera detonó los demás– fue el legislativo: la Ley de Energía Geotérmica (LEG). La LEG fue una ley secundaria de la Reforma Energética de 2013, cuya apertura a la inversión privada dio lugar a mayor interés privado en la inversión geotérmica.

Para iniciar el capítulo se describe la Reforma Energética de 2013 así como la LEG para ilustrar las oportunidades que ofrecieron a la geotermia. Asimismo, se expone el caso de Domo de San Pedro (DSP), la primera planta geotermoeléctrica privada en el país. DSP es relevante porque, además de expandir la capacidad instalada de geotermia en el país, representa un contraejemplo a la necesidad argumentada de la Reforma y de la LEG; en efecto, el proyecto comenzó en 2011, antes de que se plantearan estos mecanismos legislativos. Luego se presentan el resto de mecanismos de fomento que acompañaron a la LEG. Al finalizar la década del 2010 el desarrollo de la geotermia no siguió la trayectoria prometedora que los

mecanismos de fomento quisieron provocar. Sin embargo, se reconoce el intento de la LEG y los mecanismos de buscar otras formas de desarrollo fuera de CFE. Para finalizar el capítulo, se señala el papel del *carbon lock-in* en la etapa expuesta.

I. La Reforma Energética de 2013 y la reforma al sector eléctrico

La Reforma Energética modificó los artículos 25, 27 y 28 de la Constitución. A partir de ahí se publicaron nueve leyes secundarias y se modificaron doce existentes y, posteriormente, se emitieron veinticuatro reglamentos y un ordenamiento.³⁰¹ La Reforma se planteó como un “paso decidido” para modernizar el sector energético mexicano, tanto en materia de hidrocarburos como electricidad.³⁰² Los cambios que planteó no fueron menores: representaron un cambio de paradigma para alinear el sector energético con el proyecto económico que surgió a finales de los 1980.³⁰³ Paralelamente, a nivel mundial se comenzó a notar el freno mexicano en geotermia, pues México descendió al cuarto lugar mundial en capacidad instalada “cediendo lentamente el liderazgo que, en alguna época, lo caracterizó”.³⁰⁴

A pesar de que no sea el objeto de estudio central de este capítulo o de esta investigación, es relevante señalar que la Reforma Energética de 2013 orbitó alrededor de Pemex y los hidrocarburos de la nación. A grandes rasgos, la Reforma representó otro intento de reconfigurar las lógicas corporativas de Petróleos

³⁰¹ Pedro Joaquín Coldwell en Enrique Ochoa Reza, *Para entender la reforma al sector eléctrico* (México: Producciones Sin Sentido Común, 2015), 11.

³⁰² Secretaría de Energía (SENER), "Explicación ampliada de la Reforma Energética," Gobierno de México, 2013, acceso 11 de febrero de 2025, p.3 https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/10233/Explicacion_ampliada_de_la_Reforma_Energética1.pdf.

³⁰³ Isabelle Rousseau, "La renovación institucional en el sector hidrocarburos y el desarrollo industrial: un balance de la Reforma Energética 2013-2014," en *Reforma Energética y Desarrollo Industrial. Un compromiso inaplazable*, coord. Arturo Oropeza García (Ciudad de México: UNAM/Instituto de Investigaciones Jurídicas, 2015), 52.

³⁰⁴ María de Lourdes Melgar Palacios, "La revolución energética que México requiere," *Revista Digital Universitaria* 13, no. 10 (1 de octubre de 2012): 8.

Mexicanos para mejorar su desempeño y rentabilidad, y tratar de mitigar su gran peso en las finanzas nacionales, sobre todo tras la caída de las reservas de crudo ligero del país. Más allá de los ajustes corporativos, el mecanismo principal que se utilizó fue introducir a Pemex en un esquema de competencia en el cual se le abrieron las puertas a otras empresas de hidrocarburos para que pudieran operar en el país. No obstante, desde el inicio de la Reforma, se reiteró y ratificó que los hidrocarburos que se encuentran en el subsuelo siguen siendo propiedad de la nación.³⁰⁵ Simplemente, al abrir las puertas a la competencia, se buscaba modernizar Pemex para que, al entrar en competencia con otras empresas, representara una de las mejores opciones en el mercado. En otras palabras, la idea era que muchos de los problemas operativos y financieros de Pemex se superarían al tomar los pasos necesarios para que fuera una empresa competitiva dentro del mercado nacional. Algo similar sucedió en el sector eléctrico.

La reforma al sector eléctrico se hizo con el objetivo general de modernizar la operación e infraestructura del SEM para optimizar su funcionamiento y brindar precios más accesibles a los usuarios del servicio eléctrico. En particular, reducir los precios era fundamental porque, antes de la Reforma, las tarifas eléctricas en México eran, en promedio, 25% más caras que en EEUU. Esta comparación toma en cuenta el subsidio eléctrico. Sin él, las tarifas serían un 73% más caras que las del país vecino.³⁰⁶ Tarifas tan elevadas constituyen un freno a la economía mexicana por el papel de la electricidad en la industria, el comercio y el sector de servicios.³⁰⁷ En suma, a nivel social, conviene que los ciudadanos tengan acceso a un servicio eléctrico más barato.

³⁰⁵ SENER, "Explicación ampliada de la Reforma Energética," p. 3.

³⁰⁶ Enrique Ochoa Reza, *Para entender la reforma al sector eléctrico* (México: Producciones Sin Sentido Común, 2015), 21.

³⁰⁷ Ochoa Reza, *Para entender la reforma*, 21,

Con esto en mente, la Reforma recurrió a la competencia como mecanismo transformador para abaratar los costos. Para ello, se establecieron cambios en las cinco etapas del sistema eléctrico: generación, despacho, transmisión, distribución y comercialización. Un cambio significativo fue que, en materia de generación, se permitió la participación del sector privado para fortalecer la competencia. Esto creó el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), que se diseñó tras un análisis de las mejores prácticas internacionales de sistemas y mercados eléctricos. El MEM contó con tres instrumentos asociados a su ejecución: las subastas de largo plazo, las subastas de mediano plazo y las subastas de derechos financieros de transmisión.³⁰⁸ En cuanto al despacho, el CENACE se independizó de la CFE para ejercer un mandato sencillo: despachar la energía de menor costo primero.³⁰⁹ Este punto es de suma relevancia para las energías renovables que, en promedio, tienen un costo de generación más barato que los hidrocarburos.³¹⁰ Esto se debe a avances tecnológicos y al abaratamiento de sistemas de almacenamiento para energías renovables intermitentes. Además, una de las ventajas más grandes de las energías renovables es que la fuente de energía que aprovechan no tiene costo de extracción y, en teoría, es eterna –el Sol, el viento, el calor geotérmico, etcétera–. Finalmente, los procesos de transmisión y distribución permanecieron exclusivamente bajo el control del Estado, con la posibilidad de hacer contratos con empresas privadas para construir infraestructura.³¹¹

Aunado a su atributo de tener costos de generación competitivos, la Reforma tuvo como objetivo específico ampliar la participación de las energías limpias en la matriz

³⁰⁸ César Emiliano Hernández Ochoa, *Reforma energética electricidad* (Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica, 2018), 40.

³⁰⁹ Dentro de los cinco pasos del proceso de suministro eléctrico el segundo es el despacho, es decir, designar a dónde va la electricidad generada. El CENACE es el centro de operación cuyo trabajo es despachar la electricidad. Con el mandato de despechar la electricidad más barata, tenía que darle prioridad a las fuentes de generación menos costosas e inyectar primero su electricidad a la red.

³¹⁰ Ochoa Reza, *Para entender la reforma al sector eléctrico*, 30.

³¹¹ *Ibid.*, 17

energética nacional.³¹² Esto se hizo en parte para armonizar la Reforma con los compromisos climáticos a los que México se había suscrito durante el sexenio de Felipe Calderón y con las legislaciones existente al respecto, en concreto: la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, publicada en 2008, y la Ley General de Cambio Climático, publicada en 2009³¹³ que estableció el objetivo de alcanzar un 35% de generación eléctrica renovable para 2024. A pesar de que, actualmente, la meta no se cumplió, en su momento fue relevante porque México fue el segundo país a nivel mundial en establecer metas de generación limpia en su marco normativo, después del Reino Unido.³¹⁴

Además del esfuerzo armonizador de la nueva política energética con la política climática, la Reforma incluyó a las renovables por los beneficios de expandirlas en la matriz energética. La energía geotérmica recibió su propia ley, algo que nunca antes había existido. La LEG es una de las nueve leyes secundarias que se publicaron con la Reforma Energética de 2013. En su artículo 1, estipula que “tiene por objeto regular el reconocimiento, la exploración y la explotación de recursos geotérmicos para el aprovechamiento de la energía térmica del subsuelo dentro de los límites del territorio nacional, con el fin de generar energía eléctrica o destinarla a usos diversos.”³¹⁵ Es explícito el objetivo de regular el aprovechamiento de la geotermia para generar electricidad u otras aplicaciones; sin embargo, toda la capacidad instalada de energía geotérmica en México se desarrolló sin la LEG o un mecanismo similar –inclusive Domo de San Pedro, la única planta geotermoeléctrica privada operante hasta la fecha–. Entonces, dado que el desarrollo de la geotermia ya

³¹² Hernández Ochoa, *Reforma energética electricidad*, 16.

³¹³ *Ibid.*, 21.

³¹⁴ *Ibid.*

³¹⁵ Ley de Energía Geotérmica, Diario Oficial de la Federación (DOF), 11 de agosto de 2014.

había despegado en México, surge una gran pregunta al momento de analizar el contenido de la LEG y su impacto en la industria geotérmica nacional: ¿La LEG era necesaria para impulsar el fomento de la geotermia? Curiosamente, el origen de la Ley partió de esa incógnita.

En 2013 la Secretaría de Energía (SENER) volteó a ver el panorama nacional de la geotermia y ofreció al Banco Interamericano de Desarrollo (BID) una consultoría para determinar si era necesario hacer un instrumento legislativo particular para la geotermia en aras de fomentarla.³¹⁶ Recordemos que, antes de la LEG, la geotermia se regulaba bajo la Ley de Aguas Nacionales.³¹⁷ Por lo tanto, dado que la geotermia ya cabía dentro de un marco legislativo, cobra sentido cuestionar si una ley exclusiva para la energía geotérmica era imprescindible; aunado a que la CFE ya contaba con décadas de especialización en su explotación e incluso existía un precedente de inversión privada en energía geotérmica. La consultoría del BID concluyó que una ley no era necesaria “pero sería conveniente”.³¹⁸ Esto introduce otras preguntas: ¿por qué sería conveniente y con qué objetivos?

Antes de adentrarnos en el análisis del contenido de la LEG y sus alcances, se revisa el caso de Domo de San Pedro, la planta privada de Grupo Dragón. DSP es un caso relevante por ser la primera geotermoeléctrica privada de México, antes de la LEG y de la apertura a privados que trajo la Reforma. Su historia arroja luz sobre los retos inherentes de la energía geotérmica y sobre su gestión en México y ofrece un acercamiento novedoso a la misma. Además, la historia de DSP demuestra que la LEG no era necesaria para aumentar el desarrollo de la geotermia; también señala algunas razones por la que sí era conveniente.

³¹⁶ Entrevista K, 9 de enero de 2025.

³¹⁷ Para un análisis profundo de la regulación geotérmica antes de la Reforma, véase: Ramírez Bueno, Michelle Alejandra. *Geotermia: análisis de la regulación actual y propuesta*. Tesis de licenciatura, Escuela Libre de Derecho, 2014.

³¹⁸ Entrevista K, 9 de enero de 2025.

II. Domo de San Pedro: desarrollo geotérmico sin necesidad de la LEG

Grupo Dragón (GD) –el ala energética de Grupo Salinas– se involucró en energía geotérmica en México tras descubrir que era posible explotarla en el país y apreciar los beneficios que traería a las empresas del Grupo Salinas (GS). Inicialmente, se le ofreció a GD hacer un proyecto geotérmico en Honduras. Sin embargo, al investigar más la geotermia, notaron el gran potencial de México para explotarla.³¹⁹ Enseguida comenzaron con estudios propios de evaluación de exploración geotérmica en el país, siempre en consideración de los posibles beneficios comerciales para el Grupo.³²⁰ Una vez evaluado el panorama, el principal motivo para llevar a cabo su propio proyecto geotérmico fue garantizar el “suministro de energía verde a las empresas de Grupo Salinas buscando reducir los efectos del cambio climático.”³²¹ En suma, al percatarse de que México tiene las particularidades geológicas necesarias para explotar geotermia, GD pudo apreciar los beneficios que brindaría a las empresas de GS para satisfacer su consumo energético de manera segura y renovable. Sobre la misma línea, Ninfa Salinas, presidenta de Grupo Dragón, comentó lo siguiente en una entrevista publicada en YouTube:

“Yo quería perforar pozos geotérmicos porque sé que México tiene una geografía y una posición privilegiada en el mapa en donde hay calor, en donde, además, hay agua, en donde la roca se puede perforar y puedes obtener ese recurso. Que, además, es no sólo renovable, sino que, si lo cuidas, podría ser inagotable.”³²²

Después de su evaluación y exploración, Grupo Dragón determinó que explotaría un yacimiento geotérmico en Nayarit y construyó su planta de energía geotérmica: Domo de San Pedro. Por el lado regulatorio, GP fue creativo a la hora de conseguir los

³¹⁹ Entrevista K, 9 de enero de 2025.

³²⁰ Grupo Dragón, *Temas y Preguntas DSP*, documento proporcionado en comunicación personal.

³²¹ *Ibid.*

³²² Oso Trava, *Disciplina FAMILIAR y Energía Renovable | NINFA SALINAS #285*, YouTube video, publicado 24 de junio de 2024, <https://www.youtube.com/watch?v=F5cgfS4u5Ro>.

permisos correspondientes para llevar a cabo el proyecto. A pesar de que la geotermia se regía bajo la LAN, optaron por conseguir una concesión minera para explotar el campo.³²³ En efecto, la concesión minera otorga exclusividad de explotación, mientras una concesión de agua no.³²⁴ La exclusividad de explotación –de desarrollo– facilita la llegada de inversiones. Años después, como se verá adelante, la LEG también incorporó principios de exclusividad vinculados a los yacimientos geotérmicos. Con una inversión inicial pronosticada en los tres mil millones de pesos, las perforaciones iniciales en DSP comenzaron en 2011 y la planta inició la generación eléctrica en 2015, con dos unidades de 5MW cada una.³²⁵ Cuando se publicó la LEG en 2014, GP siguió los procedimientos que dicta para regularizar a DSP bajo el nuevo esquema legislativo.

A lo largo de su desarrollo, Domo de San Pedro se ha enfrentado a los retos inherentes de la geotermia. Por el lado técnico, GD tuvo éxito en la perforación de los primeros cinco pozos; sin embargo, a pesar de que sus perforaciones subsecuentes encontraron las temperaturas adecuadas, los pozos estaban secos. No obstante, a pesar de no conocer los retos específicos a los que se enfrentarían, Grupo Dragón sabía que la geotermia implicaría dificultades medianamente impredecibles y, pese a ello, decidió adentrarse en la producción de energía geotérmica. Incluso el experto nacional en geotermia, la CFE, le advirtió de las dificultades y riesgos. Ninfa Salinas comenta al respecto en una entrevista:

“Cuando me senté con [Alfredo Elías Ayub] que en ese tiempo era director de CFE me dijo ‘Ninfa, ni te pierdas tu tiempo. No vas a poder. [...] Mira, eso lo hace el gobierno; es un problema. Es un problema cuando sí sale, cuando no sale, es una cosa técnica. Es un mundo

³²³ Entrevista K, 9 de enero de 2025.

³²⁴ *Ibid.*

³²⁵ Grupo Dragón, *Temas y Preguntas DSP*, documento proporcionado en comunicación personal.

de ingenieros de hombres, no les va a gustar que vengas ahí a moverles el, el alambre [sic].’

»326

La anécdota es ilustrativa porque comunica cierto determinismo de que la geotermia es tan compleja que sólo la CFE y su peso estatal puede lidiar con ella. Sin embargo, a pesar de la falta de precedentes de participación privada en la geotermia, Grupo Dragón ofreció un acercamiento novedoso hacia la industria geotérmica nacional al explotar exitosamente una fuente de energía que históricamente se limitaba al gobierno. También ofrecieron un acercamiento novedoso en cuanto a las aplicaciones de la geotermia. Además de generar electricidad, la planta busca contribuir al desarrollo económico local de las comunidades aledañas. Lo está haciendo mediante aplicaciones directas de la geotermia, en específico, un deshidratador de alimentos que se desarrolló en colaboración con la UNAM. Hoy en día, Domo de San Pedro opera con 25MW de capacidad instalada y sus planes a futuro incluyen la posible expansión de capacidad y la exploración de aplicaciones cascada con un interés en aplicaciones industriales.³²⁷

III. Ley de Energía Geotérmica (LEG): instrumento legislativo de fomento

La larga trayectoria de CFE con la geotermia más el caso de DSP demuestran que la LEG no era indispensable para fomentar el desarrollo de la geotermia en México. Sin embargo, sí demuestran por qué la evaluación del Banco Interamericano de Desarrollo concluyó que un instrumento legislativo de fomento sería conveniente. En primer lugar, al ser una energía cuya explotación estaba dominada por el sector público, con la apertura que ofreció la Reforma, no quedaba claro cómo los privados podrían

³²⁶ Oso Trava, *Disciplina FAMILIAR y Energía Renovable | NINFA SALINAS #285*, YouTube video, publicado 24 de junio de 2024, <https://www.youtube.com/watch?v=F5cgfS4u5Ro>.

³²⁷ Grupo Dragón, *Temas y Preguntas DSP*, documento proporcionado en comunicación personal.

explotar la geotermia. Esto se aprecia en la creatividad de Grupo Dragón para llevar a cabo su proyecto. Por lo tanto, uno de los objetivos de la LEG fue formalizar protocolos de desarrollo de proyecto, desde la exploración hasta la explotación, para, en última instancia, otorgar certeza jurídica a posibles inversionistas en geotermia.

Entonces, ¿cómo se diseñó la LEG para regular satisfactoriamente a la geotermia y garantizar la certeza que buscaba? En primer lugar, el proceso de diseño consultó a expertas y expertos para que emitieran sus recomendaciones sobre el contenido de la ley. El perfil de expertos consultados fue variado; sin embargo, todos tenían una trayectoria y curiosidad especializada en la geotermia. A continuación, se comparte la trayectoria de dos de ellos³²⁸: el Dr. Gerardo Hiriart y la Mtra. Michelle Ramírez.

Gerardo Hiriart es ingeniero naval chileno con una amplia trayectoria en la academia, CFE y en el sector privado. Llegó a México en 1973 y se incorporó como investigador en el Instituto de Ingeniería en la UNAM.³²⁹ En 1980 comenzó a trabajar en la CFE donde se involucró en el área geotérmica. Gracias a su experiencia e interés en la geotermia, en 1993 fue nombrado Gerente de Proyectos Geotermoeléctricos, cargo que ocupó hasta el 2003.³³⁰ Además de su especialización en geotermia, cuenta con experiencia en investigación e implementación de proyectos de otras energías renovables. Su investigación geotérmica no es menor; ha coordinado secciones

³²⁸ El hecho de mencionar a Hiriart y Ramírez en particular no desestima la trayectoria y trabajo de todos los otros actores involucrados en el diseño de la LEG. Como se expresa desde el capítulo anterior, el impulso de la geotermia en México siempre ha estado ligado a profesionistas serios, con pasión hacia el tema y que, en varios casos, le han dedicado su carrera profesional a la geotermia. No se mencionan más personas porque la información de quién participo en el diseño no es pública, por lo que se sostiene la incógnita de quiénes se involucraron. Para la realización de esta investigación se tuvo el privilegio de conversar con Hiriart y Ramírez, por lo que se conoció su participación. Con lo anterior en mente, investigar a detalle quiénes se involucraron en la creación de la LEG y con qué motivos es otra posible vía de investigación que contribuiría a la riqueza histórica de la energía geotérmica, las energías renovables y la política energética de México.

³²⁹ Instituto de Ingeniería, *Revista Digital Universitaria*, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), acceso 25 de febrero de 2025, <https://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art49/curriculum.htm>.

³³⁰ Comunicación personal.

correspondientes para reportes del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre Cambio Climático y del BID. Es fundador y director de la consultora privada GeoKeri, especializada en tecnologías geotérmicas y asesoría en la materia. Notoriamente, uno de los proyectos recientes de GeoKeri fue asesorar al gobierno colombiano para la creación de su legislación geotérmica.³³¹

Michelle Ramírez es abogada de formación en la Escuela Libre de Derecho. Actualmente es consultora de financiamiento climático, descarbonización y energía geotérmica en el Banco Interamericano de Desarrollo.³³² Sin embargo, antes de ello, dirigió la Alianza Geotérmica global de la IRENA y previamente fue la primera directora de geotermia en la Secretaría de Energía.³³³ Recientemente concluyó una maestría en Manejo Internacional de Negocios en *Berlin School of Economic Law*, con una tesis acerca de un análisis las regulaciones y políticas públicas sobre geotermia en distintos países. Este análisis nos lleva al proceso de diseño de la LEG, que Ramírez lideró.

Respecto al resultado de la consulta del BID –aunque una ley no era necesaria, sin embargo era conveniente–, se empezó por analizar las mejores prácticas internacionales al respecto. Nuevamente, Ramírez coordinó este trabajo y los resultados se reflejan en el contenido de la LEG. No obstante, la versión final de la LEG no es sólo producto del trabajo de Ramírez. Los borradores iniciales fueron revisados por legisladores, quienes hicieron observaciones e implementaron cambios en el contenido. Aunque no se puede saber la extensión de los cambios, indicaron que los legisladores tenían un entendimiento limitado de la geotermia, lo que afectó el contenido y aplicación de la LEG.

³³¹ Entrevista J, 6 de enero de 2025.

³³² Michelle Ramírez, *Blog de Energía del BID*, Banco Interamericano de Desarrollo (BID), acceso 25 de febrero de 2025, <https://blogs.iadb.org/energia/es/author/michellera/>.

³³³ *Ibid.*

“Pues nuestros legisladores no saben de, no saben de geotermia. Entonces hubo muchos cambios que se hicieron del digamos que de la propuesta que le hizo el BID a la Secretaría de Energía que se presentó a través del Ejecutivo en el Legislativo y los cambios que legislativo hizo, entonces ahí tuvo muchos cambios no tan positivos; por ejemplo, se habla de usos diversos porque a los legisladores no les sonaba directos. ‘¿Cómo directos? ¿Directos de qué? Que sean diversos.’ [implementaron los legisladores]”³³⁴

La LEG se compone por 66 artículos divididos en 7 capítulos: 1) Disposiciones Generales, 2) De los Registros, Permisos y Concesiones³³⁵, 3) De la Información del Subsuelo Nacional, 4) Informes, Verificación y Medidas de Seguridad, 5) Del Registro de Geotermia, 6) Informes, Sanciones y Recursos y 7) Disposiciones Finales. Además, cuenta con trece artículos transitorios.

Además de las disposiciones protocolarias y los procesos regulatorios, es importante señalar qué aspectos dentro de estos parámetros vuelve la LEG conveniente para inversionistas. En concreto, los permisos de exploración y las concesiones de explotación garantizan exclusividad del recurso geotérmico. Esto es importante porque, no sólo asigna únicamente los productos de la explotación a quienes consigan los permisos y concesiones; además si uno de los mayores riesgos que representa la geotermia es no saber si los yacimientos geotérmicos son aptos para explotación, la exclusividad garantiza que una vez que un actor confirma la productividad de un yacimiento, no llegará un tercero a beneficiarse de los esfuerzos de exploración previos. Respecto a las partes interesadas en la LEG, le corresponde a la SENER interpretar la LEG y procesar los trámites correspondientes, mientras que la CFE entra junto con los actores privados en el proceso de adquisición de permisos y concesiones. A continuación, se exponen otros instrumentos de fomento que se

³³⁴ Entrevista K, 9 de enero de 2025.

³³⁵ El capítulo se subdivide en siete secciones: Del Reconocimiento, De los Permisos de Exploración, De las Concesiones de Explotación, De la Cesión de Derechos, Disposiciones aplicables a los Permisos y Concesiones, De la Terminación, Revocación y Caducidad de los Permisos y de las Concesiones y del Procedimiento de la Licitación Pública. Ley de Energía Geotérmica, 2014.

implementaron en los años subsecuentes al 2014 y, en conjunto, completan esta nueva etapa de proactividad para la geotermia nacional. Finalmente, se concluye con el análisis de los resultados.

IV. Incentivos de fomento financieros

Por el lado financiero, el primer mecanismo que existió se llamó “Crédito Exploratorio Asegurado”; buscaba cubrir el riesgo de la exploración de pozos geotérmicos. Sin embargo, nunca se ejecutó por no ser atractivo para los desarrolladores (es complicado y caro).³³⁶ A partir de su fracaso, el BID emitió recomendaciones y se diseñó un Programa de Financiamiento y Transferencia de Riesgos para Geotermia. El contenido se modificó sustancialmente entre 2017 y 2024, los cambios causaron que su aplicación fracasara y tampoco se aprovechara el programa.³³⁷ Similarmente, en el 2019, México se evaluó elegible para participar en el *Geothermal Development Facility for Latin America (GDF LA)*, un mecanismo de financiamiento de la Unión Europea. Sin embargo, para 2024, tampoco se había aprovechado.

V. Incentivos de fomento de investigación

También existió un componente importante de instrumentos de fomento a partir de la investigación. Destacan el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) y GEMEX, un proyecto en colaboración con la Unión Europea. El primero fue un proyecto de investigación colaborativa entre varias instituciones,

³³⁶ Michelle Ramírez, *How Do Country-Specific Policy and Regulatory Differences Impact Geothermal Development?* (Master’s thesis, Berlin School of Economics and Law, September 2024), 64.

³³⁷ *Ibid.*

lideradas por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Su objetivo principal fue la promoción de la innovación y del desarrollo de la energía geotérmica en México, aunque también hizo contribuciones para los usos directos de la geotermia.³³⁸ En suma, el proyecto fue un esfuerzo muy completo para actualizar el conocimiento de la geotermia en México y sus posibilidades de desarrollo al tomar en cuenta los avances tecnológicos más innovadores y reanimar el cuerpo nacional de recursos humanos especializado en geotermia. El Centro se consolidó a inicios de 2014 y operó hasta el año 2020.

En sus aportaciones generales reafirmó y actualizó el potencial de generación de energía geotérmica en México. Sin embargo, dado que uno de sus objetivos era la innovación, concluyeron que tendrían más posibilidades de incidir en la industria de las aplicaciones directas, puesto que la generación eléctrica ya tiene tecnologías establecidas mientras que el aprovechamiento de la geotermia a baja y mediana temperatura requiere diseños tecnológicos *ad hoc*.³³⁹ Con esto en mente, se quiso impulsar una ingeniería mexicana que pudiera aportar al desarrollo de dispositivos tecnológicos especializados.³⁴⁰ Los resultados en usos directos fueron positivos. Entre ellos estuvo la instalación de las primeras bombas de calor –para aclimatación de espacios– instaladas en el país, con una capacidad instalada de 133 kW térmicos. Asimismo, gracias a proyectos impulsados por CeMIEGeo, se constituyeron tres empresas dedicadas a aprovechar el calor geotérmico para usos directos, específicamente para la desalinización de agua y para la deshidratación de alimentos. Las empresas son: Ingeniería, Energía y Sustentabilidad Mexicana S.A. de C.V., PI Ingeniería S.A. de C.V. e Ingeniería Verde del Noroeste S.A. de C.V..

³³⁸ CeMIEGeo, *Contribución a la sociedad y al conocimiento* (primera edición, marzo de 2023; Ensenada, B.C., México: CICESE, 2023), 9.

³³⁹ *Ibid.*

³⁴⁰ CeMIEGeo, *Contribución a la sociedad y al conocimiento*, 18.

Otro aspecto relevante de CeMIEGeo fue la visibilidad internacional que atrajo. Esto permitió que la oficina internacional del Conacyt negociara convenio de colaboración con la Comunidad Europea para el fomento geotérmico en México. Juntos impulsaron el segundo proyecto de investigación, GEMEX, para la cooperación entre México y Europa en investigación para el desarrollo de proyectos EGS y sistemas geotérmicos súper calientes. GEMEX duró de octubre del 2016 a mayo del 2021.³⁴¹

Los hallazgos del CeMIEGeo son de alto valor porque actualizaron la información y tecnología geotérmica en el país. No obstante, el propio reporte de resultados de CeMIEGeo concluye que, en última instancia, para impulsar el desarrollo de la geotermia en México:

“Será necesario fomentar una mayor inversión pública y privada en proyectos que permitan el aprovechamiento integral de los recursos geotérmicos del país, para generar energía eléctrica limpia, pero también para el uso directo de la energía térmica en proyectos productivos que potencien el desarrollo social y económico de las comunidades.”³⁴²

VI. Incentivos de fomento fiscales

Respecto a instrumentos fiscales, el único incentivo relacionado es una deducción de impuestos a la hora de comprar maquinaria para las energías renovables, siempre y cuando se opere durante los cinco años después de la deducción.³⁴³

³⁴¹ Comisión Europea, “Advanced Geothermal System for Deep Geothermal Heat and Power Production,” consultado el 3 de diciembre de 2024, <https://cordis.europa.eu/project/id/727550>.

³⁴² CeMIEGeo, *Contribución a la sociedad y al conocimiento*, 27.

³⁴³ Ramírez, *How Do Country-Specific Policy and Regulatory Differences Impact Geothermal Development?* 66.

VII. Análisis de implementación

La suma de instrumentos logró la inversión de 565 millones de dólares, pública y privada, para proyectos geotermoeléctricos.³⁴⁴ Esto suena prometedor, sin embargo, las inversiones no se consolidaron ni se llevaron a cabo en nuevos proyectos de gran escala.³⁴⁵ De manera tangible, la capacidad instalada no incrementó con nuevas plantas, ni de CFE ni privadas: Domo de San Pedro sigue siendo la única planta privada del país. Ahora bien, ¿por qué la inversión llegó y *se fue*? No hay una explicación escrita al respecto. Sin embargo, en conversaciones con expertos que se involucraron en iniciativas de plantas, a partir del 2018 la SENER frenó el desarrollo a la hora de cumplir con los plazos de los permisos y concesiones de exploración y concesión.³⁴⁶ Esto frenó proyectos cuyo potencial ya estaba demostrado, como uno de Grupo Carso a las afueras de Celaya.³⁴⁷ Al observar estos casos, se desincentivó la inversión privada en general por no tener certeza jurídica: No fue una carencia de la LEG, sino un incumplimiento de parte de las autoridades probablemente vinculado al poco interés que el gobierno de López Obrador en las energías limpias y en la generación eléctrica privada.

A esto se le suma que los privados en México no tienen como motivación o como misión primordial satisfacer la demanda energética nacional, sino satisfacer sus propias demandas energéticas. Un caso evidente es la planta de Volkswagen en Puebla.³⁴⁸ Los terrenos de la planta tienen yacimientos geotérmicos que podrían explorarse para una futura explotación y, en el mejor de los escenarios, contribuir al abastecimiento eléctrico de la planta. Sin embargo, considerando la situación, los

³⁴⁴ Michelle Ramírez, *Blog de Energía del BID*, Banco Interamericano de Desarrollo (BID), acceso 25 de febrero de 2025, <https://blogs.iadb.org/energia/es/author/michellera/>.

³⁴⁵ Entrevista K, 9 de enero de 2025.

³⁴⁶ Entrevista H, 12 de noviembre de 2024.

³⁴⁷ *Ibid.* Llama la atención que se frenara el proyecto geotérmico de Carso dada la cercanía del grupo con el gobierno para proyectos petroleros y de gas. Da pie a una posible investigación.

³⁴⁸ Entrevista L, 10 de enero de 2025.

posibles riesgos, y los trámites de permisos ante CFE, Volkswagen –al evaluar otras alternativas de generación de energía limpia– optó por instalar paneles fotovoltaicos en generación distribuida, conectados a la red para venderle a CFE sus superávits de electricidad y abastecerse de la Comisión en caso de déficit. No se puede más que especular acerca de los motivos de trasfondo de Volkswagen al momento de escoger en qué energía invertir. Empero, sin las complicaciones que los privados enfrentaron con la geotermia, quizás se hubiera considerado más seriamente.

Además, más allá de su incumplimiento, desde un punto de vista técnico, la LEG tiene un entendimiento limitado de la geotermia y sus aplicaciones porque se enfoca casi exclusivamente en el uso eléctrico y deja de lado a los usos directos. El enfoque es comprensible a partir de su nombre —“Ley de *Energía* Geotérmica”³⁴⁹; sin embargo, la ley también reconoce los usos “diversos”, pero su incorporación superficial a la legislación demuestra una falta de entendimiento del alcance de las aplicaciones directas de la geotermia. No se especifica la regulación particular o las posibilidades de aplicación de usos geotérmicos no eléctricos, cuyo aprovechamiento está reconocido para varias industrias productivas. La deficiencia se puede explicar al apuntar que la Reforma tuvo un enfoque energético y eléctrico. Sin embargo, los usos directos podrían incluirse en la parte energética. Empero, cabe destacar que una regulación específica para es indispensable para aprovecharse los usos directos; sin embargo, no incluir sustantivamente más aplicaciones limita la difusión del conocimiento de la explotación geotérmica y las posibilidades de su explotación.

³⁴⁹ Énfasis propio.

VIII. Los *lock-ins* de la geotermia en esta etapa

El aumento de las energías renovables que quiso impulsar la Reforma fue un intento de escapar del *carbon lock-in* del sector. Sin embargo, se impulsaron a una escala pequeña y los pocos resultados que tuvo demuestran la inercia del sector frente a la adopción de tecnologías alternativas. Por su parte, la LEG mantuvo el *lock-in* tecno institucional de la energía geotérmica. Con la invitación de la participación privada en geotermia de gran escala este *lock-in* no se limitó a CFE; sin embargo se mantuvieron las condiciones de un *lock-in* tecno institucional de energía geotérmica en el país. A pesar de incluir a los usos diversos, tampoco ofreció muchas alternativas para otros modos de aprovechamiento. Finalmente, la vuelta a la priorización de los hidrocarburos desde la política energética en el 2018 reforzó deliberadamente el *carbon lock-in* del sector eléctrico, a pesar de los fomentos a la geotermia y otras renovables en el sector. La consecuencia más tangible fue que las autoridades no siguieron sus plazos de cumplimiento frente a los proyectos geotérmicos que adquirieron inversión, lo que demuestra *lock-in* conductual en favor de tecnologías altas en carbono.

Conclusiones

Hubo un desarrollo muy rápido en donde distintos procesos que pueden fomentar el desarrollo de la geotermia confluyen: el interés internacional creciente en las energías renovables para mitigar al calentamiento global, el cambio paradigmático en la política energética y eléctrica que acogieron a la geotermia y los diversos instrumentos de fomento que la acompañaron. En suma, a mediados de la década del 2010 existieron varios mecanismos de fomento que, al menos en papel, prometían un

impulso prometedor para la geotermia en México. No obstante, hacia finales de la década el ímpetu geotérmico se calmó con un freno de facto al impulso público de la geotermia y, en parte consecuencia, falta de interés del sector privado.

Se podría concluir que ya se apostó por fomentar la energía geotérmica en México y que no funcionó y que, por lo tanto, para descarbonizar la matriz energética es mejor optar por otras renovables. Sin embargo, los desafíos a los que puede contribuir la geotermia prevalecen, al igual que sus ventajas tecnológicas y diversidad de aplicaciones. La demanda eléctrica sigue en aumento, la mitigación climática no deja de ser prioridad y, en términos tecnológicos, la geotermia sigue siendo una opción confiable, constante, de carga base y —con buen manejo—, inagotable para términos prácticos. Además, ni la Reforma ni los instrumentos de fomento³⁵⁰ contemplaron el potencial de todas las aplicaciones de la geotermia y dejaron en segundo plano las aplicaciones directas y los beneficios que representan. Asimismo, el desarrollo tecnológico del sector señala pasos hacia la aminoración de los riesgos de la geotermia y la comercialización de sus aplicaciones. Por lo tanto, permanece la oportunidad de impulsar a la geotermia desde el entendimiento más amplio de sus usos en beneficio de la seguridad energética, la soberanía energética, las acciones climático-ambientales nacionales y el desarrollo económico de México.

En el siguiente capítulo se explora el panorama actual y a futuro de la geotermia en el país, en consideración de la legislación más reciente, los avances tecnológicos y las tendencias globales de la industria geotérmica.

³⁵⁰ A excepción de los proyectos de investigación, que reconocen la falta de atención a los usos directos de la geotermia.

Capítulo V

El futuro de la geotermia

“Hay mucho que hacer. Apoyemos a nuestro país, a nuestra industria pública, a las empresas también para que puedan seguir desarrollándose y tengamos una muy muy buena conversación de qué podemos hacer para hacer más con menos y dejar nuestro impacto y nuestro impulso a través de la geotermia.”

- Ing. Magaly Flores, Apertura del XXXI Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana, Cuernavaca, 22 de mayo de 2025.

Introducción

Los resultados de los incentivos a la geotermia que se implementaron tras la Reforma de 2013 dejaron mucho que desear. Después de los logros insatisfactorios de la Ley de Energía Geotérmica, el desarrollo geotérmico regresó de facto a la voluntad total de SENER y CFE, que no indicaron un interés particular de expandir la capacidad instalada ni de incurrir en otros modos de aprovechamiento. Sin embargo, a inicios de 2025, dentro del paquete de leyes secundarias de la Reforma Energética de 2024 se decretó la nueva Ley de Geotermia (LG). La LG indicó un interés renovado en la geotermia y sus posibilidades dentro del sector energético nacional. De manera similar, las prioridades de política energética que introdujo la presidencia de la Dra. Claudia Sheinbaum posibilitan la reorientación del desarrollo geotérmico nacional hacia estos objetivos. En conjunto, la nueva legislación geotérmica y política energética actual fomentan nuevos modos de aprovechamiento más allá de la energía geotérmica y, entre líneas, valoran a la geotermia como una fuente de energía estratégica para la soberanía, transición, justicia y seguridad energética. En términos del *carbon lock-in*, la ley y la Reforma crean oportunidades para afrontar las

resistencias hacia tecnologías descarbonizadores que provienen del uso de fuentes fósiles.

Paralelamente, la innovación de la industria geotérmica en otras partes del mundo está creciendo mucho. Los avances en la energía geotérmica no convencional aumentan exponencialmente el potencial geotérmico del mundo, incluido México. Sobre la misma línea, la geotermia está atrayendo una atención creciente a nivel internacional.

Independientemente de cómo México planea aprovechar o no la geotermia, el potencial geológico del país se mantiene. Por ende la atención creciente a la geotermia y sus avances tecnológicos tienen implicaciones en las posibilidades de desarrollo en México y cómo el país podría (re)incorporarse a la nueva ola de desarrollo geotérmico mundial.

Para desarrollar los puntos anteriores el capítulo se estructura de la siguiente manera. Se comienza con las innovaciones tecnológicas y el panorama internacional para entender qué tanto potencial tiene la geotermia con ellas y cómo parece que se desarrollará a futuro en otras partes del mundo. Luego se discute qué necesidades crea este panorama como posible área de oportunidad para México y la experiencia mexicana en geotermia. Enseguida, explora el panorama planeado para la geotermia en México. Se discute la Reforma, las nuevas prioridades de política energética que dicta y la nueva LG. Se discute a detalle qué cambios trae la LG, por qué se formó y qué oportunidades quedan para la geotermia en el país. Finalmente se analiza el estado de los *lock-ins* que afectan a la geotermia frente a la LG y el panorama mexicano.

I. Avances tecnológicos de la geotermia

En palabras de la Agencia Internacional de Energía (IEA), la industria geotérmica global está en una coyuntura crítica –en el sentido de punto de inflexión–.³⁵¹ Se están desarrollando innovaciones tecnológicas y esquemas de aprovechamiento novedosos que desbloquean un mayor potencial de explotación geotérmica a lo largo del mundo, tanto para usos directos como para generación de electricidad. En seguida se exponen los principales avances tecnológicos que proyectan el crecimiento de la geotermia según el reporte reciente de la IEA *The Future of Geothermal Energy*, publicado en diciembre de 2024.

Nuevas tecnologías geotérmicas están facilitando el acceso a yacimientos sin explotar.³⁵² Esto significa que la geotermia puede dejar de ser un recurso que sólo se puede explotar en lugares con condiciones tecnológicas óptimas. A nivel mundial, esto permitirá que países que no pueden explotar geotermia con tecnologías convencionales puedan hacerlo y los países o regiones que ya la explotan, como México, tendrán más opciones territoriales para explotarla. A continuación, se presentan los avances más significativos por tipo de aplicación geotérmica: generación de electricidad, usos directos y colaboración con la industria petrolera y explotación de minerales estratégicos.³⁵³

A. Avances geotermoeléctricos

Los avances para la generación de electricidad corresponden a las tecnologías no convencionales. Se llaman así porque no dependen de las condiciones geológicas

³⁵¹ International Energy Agency (IEA), *The Future of Geothermal Energy* (Paris: IEA, 2024), <https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy>.

³⁵² IEA, *The Future of Geothermal Energy*, 3.

³⁵³ Para una exposición exhaustiva de los avances tecnológicos de la geotermia y sus implicaciones véase International Energy Agency (IEA), *The Future of Geothermal Energy* (Paris: IEA, 2024), <https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy>.

óptimas –calor, fluidos y permeabilidad de la roca– que permiten construir las plantas termoeléctricas actuales. Por lo tanto, también se conocen como enfoques “*reservoir-independent*”³⁵⁴, es decir, que no dependen de un yacimiento geotérmico convencional. Existen dos grandes innovaciones tecnológicas de este tipo en proceso: los *Enhanced Geothermal Systems* (EGS) y los sistemas *Closed Loop Geothermal* (CLG). El mecanismo básico de ambos es crear las condiciones de permeabilidad e inyectar fluidos para aprovechar el calor del subsuelo. Recordemos que el calor subterráneo está presente en todas partes de la Tierra; es la única constante geológica necesaria para la energía geotérmica.

Los EGS expanden la capacidad de yacimientos existentes o crean nuevos yacimientos al aumentar la permeabilidad de las rocas. Esto se logra mediante la construcción de pozos profundos que abren fracturas naturales o crean fracturas nuevas con alguno de los siguientes tres métodos: 1) estimulación hidráulica, 2) estimulación térmica o 3) estimulación química.³⁵⁵ La estimulación hidráulica es similar al *fracking* utilizado para la extracción de gas o petróleo de lutitas. En geotermia, se utiliza para propagar o reactivar fracturas en las rocas que permitan un flujo de calor aprovechable. La estimulación térmica inyecta fluidos fríos para inducir choques de calor que rompen la roca y la estimulación química inyecta compuestos químicos que disuelven minerales específicos de la roca para hacerlas permeables.³⁵⁶ Con cualquier método, las fracturas resultantes permiten que los fluidos absorban calor y lo transporten a la superficie para generar electricidad.³⁵⁷ Innovaciones de EGS permitirán acceder a calor más profundo y a mayores temperaturas, lo que aumentaría los flujos de calor significativamente.³⁵⁸ El primer proyecto piloto de EGS se inició en

³⁵⁴ IEA, *The Future of Geothermal Energy*, 36.

³⁵⁵ *Ibid.*, 37.

³⁵⁶ *Ibid.*

³⁵⁷ *Ibid.*

³⁵⁸ *Ibid.*, 38.

EEUU en 1974. Desde entonces ha habido más proyectos prueba en Australia, Finlandia, Francia, Alemania, Japón, Reino Unido y Suiza. Uno de los proyectos estadounidenses planea iniciar operaciones comerciales en 2026 y uno suizo en 2029.³⁵⁹ A pesar del potencial geotérmico que los EGS desbloquean, es importante reconocer que la estimulación hidráulica que utilizan requiere altas cantidades de agua y tiene riesgos ambientales como sismicidad inducida, por lo que puede haber oposición social a proyectos de este tipo.³⁶⁰

Los sistemas CLG –también conocidos como *Advanced Geothermal Systems* (AGS)– consisten en perforar y sellar grandes circuitos cerrados de pozos. Requieren mucha menos cantidad de agua que los EGS porque no implican estimulación de yacimientos y tienen muy pocos requisitos específicos a cada sitio, lo que facilita su desarrollo en casi cualquier parte del planeta y se asocia a menos riesgos.³⁶¹ Proyectos pilotos de sistemas CLG son más novedosos que los EGS, sobre todo porque utilizan técnicas de perforación horizontal –tecnología más reciente que la perforación vertical–. Hoy en día hay proyectos pilotos en Canadá, EEUU y Alemania.³⁶² En el siguiente diagrama se aprecian los sistemas básicos EGS y CLG en contraste con la geotermia convencional.

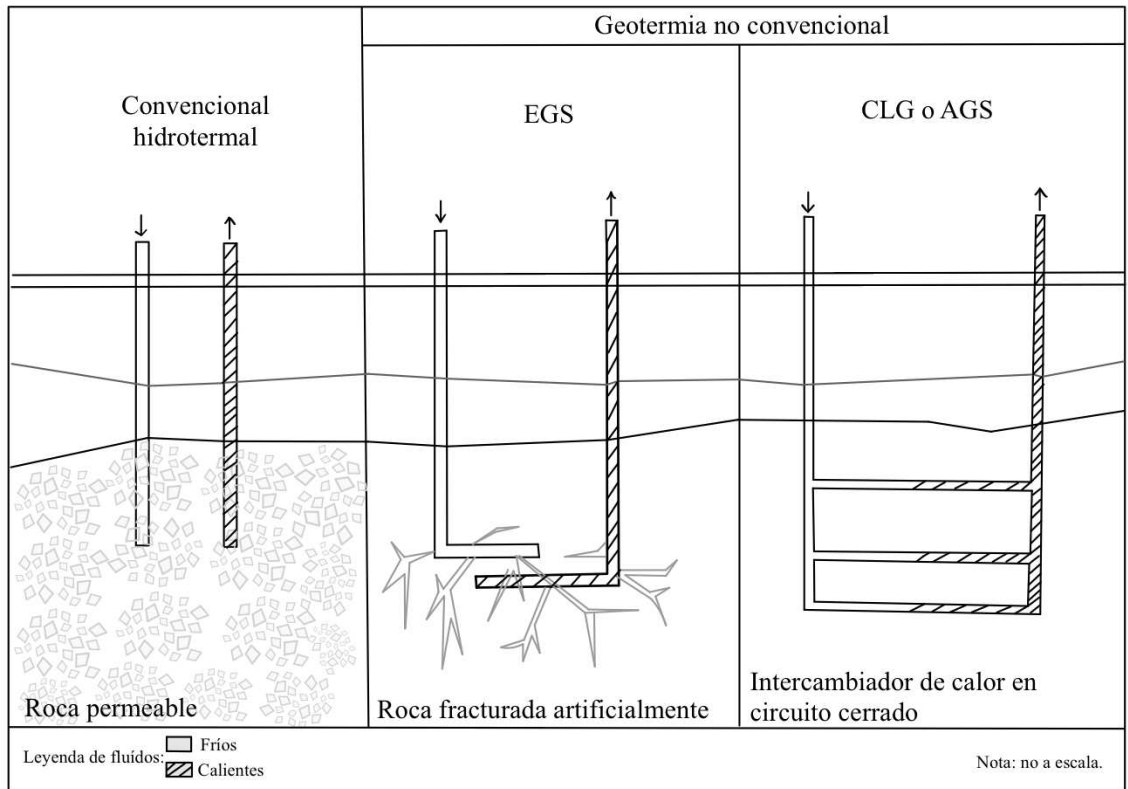
³⁵⁹ *Ibid.*, 39.

³⁶⁰ *Ibid.*

³⁶¹ *Ibid.*, 40.

³⁶² *Ibid.*

Figura 6. Comparación entre sistemas de geotermia hidrotermal, EGS y AGS³⁶³



El potencial técnico que desbloquean estas tecnologías equivale a casi 600 TW de capacidad geotérmica operante por 20 años, la cual excede el potencial de la geotermia convencional casi 2000 veces.³⁶⁴ Según la IEA, en comparación a otras fuentes renovables, la geotermia tiene el segundo potencial técnico más grande para generación de electricidad después de la energía solar fotovoltaica y casi tres veces más que la eólica terrestre y más de cinco veces más que la eólica marítima.³⁶⁵ En particular, México tiene un potencial de geotermia EGS de casi 20 TW.³⁶⁶

Empero, el desarrollo de los sistemas EGS y CLG no busca reemplazar a la geotermia convencional, sino complementarla. En otras palabras, los sistemas no

³⁶³ Reproducción propia de “Conventional (hydrothermal), enhanced geothermal and closed-loop systems” en *Ibid*, 37.

³⁶⁴ *Ibid*, 44.

³⁶⁵ *Ibid*.

³⁶⁶ *Ibid*, 47.

convencionales se piensan desarrollar en donde los sistemas convencionales son inviables. En suma, ambos tipos de tecnología pueden ampliar la cobertura del desarrollo de la geotermia. Además también se pronostica que aumente la geotermia convencional a nivel mundial. Se espera alcanzar 22 GW de capacidad instalada en 2030 y casi 60 GW para 2050 según el escenario de políticas declaradas. El aumento según los compromisos anunciados es mucho mayor.³⁶⁷ Sin embargo, ambos escenarios siguen por debajo del potencial de desarrollo económicamente viable que identifica la IEA, cerca de unos 95 GW.³⁶⁸

B. Avances en usos directos

Avances en técnicas de extracción de calor geotérmico también están desbloqueando un gran potencial, principalmente para calefacción y enfriamiento urbano. Para calefacción, el potencial es distinto dependiendo de la temperatura de los yacimientos que se quieren explotar. Destaca el aprovechamiento de yacimientos a 90°C al ser el promedio de temperatura necesaria de la mayoría de los sistemas de calefacción urbana basados en combustibles fósiles. Por lo tanto, se podrían utilizar infraestructuras existentes y reemplazar los combustibles por geotermia.³⁶⁹ Entre las regiones analizadas por la IEA, México es el tercer lugar en el mundo con mayor potencial en esta temperatura.³⁷⁰ Los diez primeros lugares son: EEUU, Indonesia, México, el resto de países miembro de la Asociación de Naciones del Sudeste Asiático (ASEAN) –sin contar a Indonesia–, Medio Oriente, África, Europa, China, Japón y por último Australia y Nueva Zelanda en conjunto.

³⁶⁷ *Ibid.*, 30.

³⁶⁸ *Ibid.*

³⁶⁹ *Ibid.*, 48.

³⁷⁰ *Ibid.*, 49.

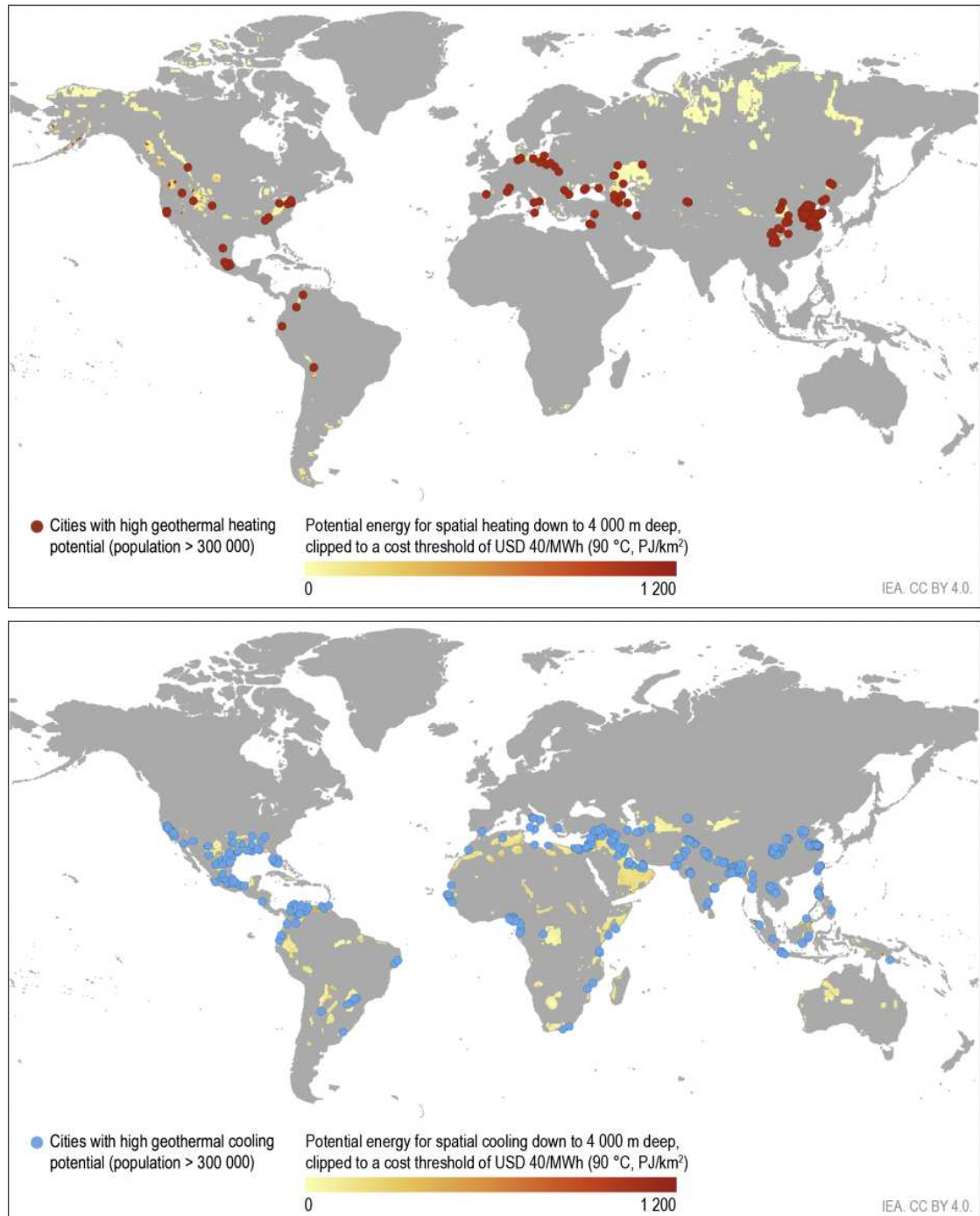
De manera similar, el potencial mundial y nacional para enfriamiento urbano con geotermia también es significativo y, de igual manera, es una alternativa de descarbonización. El enfriamiento se puede utilizar en inmuebles o para enfriamiento industrial. Una posibilidad que es atractiva recientemente es enfriar centros de datos con geotermia. A continuación, se presentan mapas de la intersección entre centros urbanos y potencial para calefacción y enfriamiento con geotermia. Como se puede ver, México tiene un potencial particular. La IEA señala explícitamente a la Ciudad de México, Pachuca, Toluca, Tlaxcala, Querétaro y Cuernavaca con un potencial de calefacción alto y a Querétaro y Celaya con potencial de enfriamiento alto, además de ciudades en el norte del país con potencial de enfriamiento.³⁷¹ Las aplicaciones industriales de enfriamiento plantean posibilidades que podrían ser atractivas para inversión. Por ejemplo, se podría promocionar la posibilidad de enfriamiento de centro de datos a base de geotermia.³⁷²

³⁷¹ *Ibid*, 51-52.

³⁷² Para más información en cuanto a uso de datos sobre el potencial de la geotermia para enfriamiento, véase: Ben King, Wilson Ricks, Nathan Pastorek y John Larsen, *The Potential for Geothermal Energy to Meet Growing Data Center Electricity Demand* (Nueva York: Rhodium Group, 11 de marzo de 2025), <https://rhg.com/research/geothermal-data-center-electricity-demand/>.

Figura 7. Mapa de intersección entre centros urbanos y potencial para calefacción y enfriamiento con geotermia.³⁷³

Overlap between urban centres and geothermal potential for district heating (top) and for cooling (bottom)



Note: Cities indicated on the map are urban areas with populations exceeding 300 000, with significant geothermal district heating or cooling potential.

Source: Project InnerSpace™ calculations for hot sedimentary aquifer systems based on GeoMap™ data with a cost threshold of USD 40/MWh.

³⁷³ *Ibid*, 51. Se muestra la figura original a falta de los datos para elaborar una propia.

Además de los usos directos e indirectos, se están desbloqueando dos grandes nuevas modalidades de aprovechamiento geotérmico: 1) una profundización de colaboración con la industria de gas y petróleo y 2) la extracción de minerales críticos.

C. Avances entra la industria de gas y petróleo y la geotermia

La geotermia siempre ha tenido semejanzas técnicas –sobre todo para la perforación de pozos– con la industria de gas y petróleo. En consecuencia, empresas petroleras han reconocido el potencial geotérmico e impulsado su desarrollo, como fue el caso de Pemex para los primeros años de la geotermia mexicana. Hoy en día, cerca de 15% de la capacidad instalada de energía geotérmica a nivel mundial se opera –directa o indirectamente– por empresas de gas y petróleo, entre ellas Chevron y Star Energy.³⁷⁴ Además, empresas de servicios para gas y petróleo también se han diversificado para la industria geotérmica.

Los avances en extracción de gas y petróleo ya han propiciado innovaciones geotérmicas, en particular para el diseño de los sistemas EGS expuestos anteriormente. Se estima que empresas de gas y petróleo han invertido cerca de 140 millones de dólares en el desarrollo de EGS y de CLG.³⁷⁵ Sobre esta línea, la industria petrolera y de gas podría ser instrumental para continuar el desarrollo geotérmico a futuro.³⁷⁶ La aplicación del *know how* petrolero en técnicas geotérmicas podría expandir su potencial y reducir sus costos significativamente, lo que beneficia sus posibilidades de desarrollo.³⁷⁷

³⁷⁴ IEA, *The Future of Geothermal Energy*, 60-61.

³⁷⁵ *Ibid.*, 56.

³⁷⁶ *Ibid.*, 60.

³⁷⁷ *Ibid.*

Para la teoría del *carbon lock-in*, esto representa una posible vía de superación de las inercias que la geotermia ha enfrentado hasta ahora. Sobre la misma línea, la industria geotérmica también ofrece beneficios importantes para la industria petrolera. Desde un punto de vista técnico, se pueden reconvertir pozos petroleros abandonados, con poco rendimiento o al final de su vida productiva a pozos geotérmicos para producción de electricidad.³⁷⁸ La posibilidad real de reconversión depende de las características particulares de cada sitio, sin embargo, no deja de ser una oportunidad prometedora. La geotermia también presenta una vía alternativa para la industria de gas y petróleo frente a la presión de disminuir la producción y uso de energías fósiles. El impulso para dejarlos atrás puede venir de la transición energética, de preocupaciones de seguridad energética, o, en casos particulares, de la disminución del rendimiento de yacimientos de gas o petróleo.

Bajo esta lógica, en un escenario de transición energética –o simplemente con proyectos de reconversión de pozos–, la industria geotérmica puede darle continuidad a las inversiones de infraestructura que encierran al gas y petróleo. En otras palabras, la participación de industrias fósiles en geotermia es una medida de continuidad para escapar del *carbon lock-in*. Además de la infraestructura, puede haber una gran transferencia laboral entre industrias, pues comparten disciplinas fundamentales como la geología, ingenierías, geoquímica, geofísica, entre otros. Esta transferencia de personal ya ocurre. Es el caso de la Dra. Marit Brommer, por ejemplo. Desde 2017 es la Directora Ejecutiva de la Asociación Internacional de Geotermia (IGA, por sus siglas en inglés³⁷⁹) pero antes trabajó en la industria petrolera, en particular, en Shell y Total Energies.

³⁷⁸ *Ibid.*, 69.

³⁷⁹ *International Geothermal Association*

D. Avances en extracción de minerales críticos

Aprovechar las salmueras geotérmicas para la extracción de subproductos minerales no es novedoso. Sin embargo, investigaciones recientes muestran que la geotermia tiene un potencial real para extraer minerales necesarios para baterías y la mayoría de energías limpias.³⁸⁰ Integrar la producción de energía con la extracción de minerales críticos puede aumentar la viabilidad económica de la geotermia y diversificar las posibilidades de ingreso de los proyectos geotérmicos.³⁸¹ La combinación también presenta otra alternativa de descarbonización, pues la industria minera es responsable de 4 a 7% de las emisiones de gases efecto invernadero a nivel mundial.³⁸²

Un mineral en específico cuya extracción es prometedora es el litio. Aunque es solamente uno de los minerales críticos necesarios para la transición tecnológica y energética, la posibilidad de explotarlo le añade valor agregado a la geotermia. Además, es un elemento demandado por su utilización en vehículos eléctricos y baterías para almacenamiento de energía y porque su extracción se concentra en un puñado de países. Por lo tanto, producirlo mitiga la dependencia de las cadenas de suministro internacionales. En consecuencia, la combinación de generación de electricidad con extracción de litio aporta doblemente a la seguridad energética de los países, lo que le da relevancia estratégica a la geotermia. Actualmente hay proyectos pilotos de extracción de litio con geotermia en EEUU y Europa, financiados principalmente por entidades públicas.³⁸³ En México, se está haciendo investigación al respecto en el Instituto de Geofísica de la UNAM³⁸⁴ y, como se discute más adelante, la nueva Ley de Geotermia contempla la explotación del litio. No obstante, a nivel

³⁸⁰ János Szanyi, Ladislaus Rybach, y Hawkar A. Abdulhaq, "Geothermal Energy and Its Potential for Critical Metal Extraction—A Review," *Energies* 16 (2023): 1.

³⁸¹ IEA, *The Future of Geothermal Energy*, 2024, 106.

³⁸² Szanyi, Rybach y Abdulhaq, "Geothermal Energy and Its Potential," 2.

³⁸³ *Ibid.*, 108.

³⁸⁴ Entrevista M, 10 de febrero de 2025.

mundial, en el presente no hay ningún proyecto comercial en operación de extracción de litio con geotermia.³⁸⁵

II. Oportunidades para México a partir de innovaciones internacionales

El despegue de la industria geotérmica a nivel mundial tiene implicaciones para México. Dado que el potencial teórico del país es “fijo” y las nuevas tecnologías incrementan las posibilidades de explotarlo, el territorio nacional no deja de ser un lugar óptimo para aprovechar ese potencial. En general, si la geotermia deja de ser una tecnología desconocida en otras partes del mundo y si se consolidan mercados geotérmicos, México podría participar o aspirar a la delantera en nichos geotérmicos que surjan. Ahora bien, de manera concreta, hay algunos aspectos en los que surgen oportunidades particulares. En seguida se comentan las posibilidades de investigación, formación y atracción de talento e industria.

México podría aprovechar su experiencia en la geotermia y ser un centro de investigación geotérmica para el desarrollo de capacidades nacionales e internacionales. Ya existen centros y proyectos de investigación importantes especialistas en geotermia o con proyectos sobre geotermia. Por ejemplo, el CeMIEGeo, el Instituto de Geofísicas de la UNAM, el programa IIDEA de la UNAM, la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) o el INEEL. Estos lugares podrían atraer talento internacional y crecer para formar al nacional y atender la demanda reciente de profesionales que acompaña a la innovación tecnológica.

Asimismo, la posibilidad creciente de aprovechar la geotermia puede ser un impulsor de la industria y, por lo tanto, de crecimiento económico. Se pueden

³⁸⁵ IEA, *The Future of Geothermal Energy*, 2024, 110.

fomentar industrias que utilicen el calor directo de la geotermia o que generen energía geotérmica para consumo propio. Por un lado, esto aliviaría la demanda eléctrica existente y por otro, ancla a las industrias a donde se desarrollen por su dependencia al calor del espacio que ocupan. Un ejemplo exitoso de atracción industrial con geotermia es Islandia. En la década de los 1990, la isla atrajo a empresas de industrias pesadas, entre ellas de aluminio, con contratos de aprovechamiento de energía geotérmica.³⁸⁶ En México, se podrían activar zonas industriales con alto potencial geotérmico, como el Bajío.

Estas ideas son extensas, sin embargo, podrían ser un punto de partida. En general, hay condiciones que se consideran deseables para fomentar el desarrollo geotérmico y, ante todo, el primer paso es aprovechar más la geotermia con la tecnología que ya hay.

A. Condiciones facilitadoras para el desarrollo geotérmico

En suma, los avances tecnológicos que se están logrando en distintos frentes de la industria geotérmica desbloquean un potencial técnico inmenso. Sin embargo, se necesitan condiciones que generen un ambiente facilitador para que el desarrollo geotérmico se pueda llevar a cabo, expandir y crear nuevas oportunidades de mercado. *The Future of Geothermal* señala que, en primera instancia, tiene que haber políticas públicas que la promuevan y la coloquen en la agenda de política energética.³⁸⁷ Estas políticas tienen que reconocer las características únicas y las ventajas comparativas de la geotermia y generar objetivos específicos para ella con una visión a mediano y largo plazo.³⁸⁸ En segundo lugar, tiene que haber mayor aceptación social de la geotermia. El rechazo social puede ser un freno significativo,

³⁸⁶ Araújo, *Low Carbon Energy Transitions*. 53-60.

³⁸⁷ IEA, *The Future of Geothermal Energy*, 2024, 110.

³⁸⁸ *Ibid*, 113.

como se ha vivido en México con el proyecto de planta de La Primavera. En tercer lugar, tiene que haber esquemas innovadores de financiamiento para mitigar el riesgo financiero y los altos costos de las etapas iniciales de los proyectos. En cuarto lugar, la capacitación para empleos especializados en geotermia tiene que incrementar, puesto que el crecimiento pronosticado necesita profesionales que lo ejecuten. Por último, tiene que fomentarse la investigación geotérmica para optimizar su desarrollo y continuar su innovación para alcanzar su potencial técnico.³⁸⁹

A continuación, se presentan los cambios en política energética y la nueva Ley de Geotermia. Se discute cómo pretende impulsar la geotermia y sus áreas de oportunidad. Asimismo, se lanza el efecto de la LG en los *lock-ins* que afectan a la geotermia.

III. Futuro planeado de la geotermia en México

Una de las primeras acciones de la presidencia de Claudia Sheinbaum fue la Reforma Energética de 2024. La Reforma busca revertir lo que el gobierno actual califica como daños de la Reforma Energética de 2013 y atender las necesidades actuales del sector eléctrico nacional. Por ejemplo, una de sus acciones principales fue reconvertir a Pemex y CFE en Empresas Públicas del Estado en lugar de Empresas Productivas del Estado que se les dio en 2013. Sobre esta línea, la política energética que dicta tiene un enfoque de protagonismo estatal y responde a retos tangibles que padece el sector energético mexicano, tales como dificultad de suministro eléctrico para atender la demanda creciente o redes de transmisión con fallas importantes a causa de su antigüedad. La Reforma tiene dos grandes guías de implementación que la acompañan: la Estrategia Nacional del Sector Eléctrico y del Plan de Fortalecimiento

³⁸⁹ *Ibid*, 113-126.

y Expansión del Sistema Eléctrico Nacional 2025-2035. Asimismo, el 18 de marzo de 2025 se expidió su paquete legislativo secundario que incluyó la nueva LG. Por lo tanto, a continuación, se analizan estos elementos para determinar qué lugar la Reforma y la LG va a dar a la geotermia.

A simple vista, si se observa el Plan de Fortalecimiento y Expansión del Sistema Eléctrico Nacional 2025-2035 se podría concluir que la geotermia no tiene un lugar prominente en la Reforma del 2024. El Plan delimita las inversiones que se harán desde CFE para fortalecer el sistema eléctrico nacional. De los 51 proyectos anunciados de electricidad con una inversión de 22 mil millones de pesos en total, ninguno es una nueva planta geotermoeléctrica.³⁹⁰ Sin embargo, con un poco más de atención se puede apreciar que la geotermia se puede acomodar dentro de la Estrategia Nacional del Sector Eléctrico por los objetivos de política energética a los que sirve y, sobre todo, que una de las leyes secundarias es la nueva Ley de Geotermia. En seguida se analizan estos dos puntos.

A. Estrategia Nacional del Sector Eléctrico y la geotermia

La Estrategia tiene cuatro ejes rectores: 1) Fortalecimiento de la planeación del sector eléctrico nacional, 2) Justicia Energética, 3) Sistema Eléctrico Robusto, Confiable y Seguro y 4) Reglas claras para asegurar e incrementar la inversión privada. Dentro del primer eje, se contempla una mayor participación de las energías renovables. Naturalmente, aquí cabe la geotermia. Sin embargo, el aumento de otras renovables también favorece teóricamente a la geotermia dada su cualidad de carga base porque una prioridad de la Estrategia es asegurar la confiabilidad del servicio eléctrico y, para

³⁹⁰ Gobierno de México, *Presidenta presenta 51 proyectos de electricidad del Plan de Fortalecimiento y Expansión del Sistema Eléctrico Nacional 2025–2030*, Presidencia de la República, 5 de febrero de 2025, <https://www.gob.mx/presidencia/prensa/presidenta-presenta-51-proyectos-de-electricidad-del-plan-de-fortalecimiento-y-expansion-del-sistema-electrico-nacional-2025-2030>.

ello, se necesita respaldar la intermitencia de las renovables más populares –eólica y solar–, algo que se puede hacer con geotermia. Sin embargo, el tercer y cuarto eje son los más relevantes para la geotermia. El tercero incluye cuatro escenarios para la transición energética. El menos ambicioso contempla un 32% de energía limpia en la matriz energética y el más ambicioso 45%.³⁹¹ En todos ellos, la geotermia cabe dentro de la posibilidad de que CFE anuncie la construcción de más plantas y dentro de la posibilidad de desarrollo de geotermia privada. Sobre esta línea, el cuarto eje corresponde a las reglas de participación privada. La Reforma permite la participación de privados en la matriz energética nacional hasta en 46% de la generación total de electricidad. Existen dos grandes maneras en las que los privados pueden participar: esquemas de consumo propio y esquemas para generación. Una nueva modalidad para la generación son los productores mixtos, es decir, con inversión pública y privada. Este esquema ha funcionado bien para la geotermia en Indonesia. Gracias a proyectos construidos bajo colaboraciones público-privadas a nivel mundial, el país lidera la expansión de capacidad instalada proyectada para 2030.³⁹² También, otro cambio de la Reforma es la idea de una Ventanilla Única para tramitar permisos y facilitar los procesos administrativos que conllevan para incentivar las inversiones privadas, entre las cuales caben proyectos geotérmicos.³⁹³ Esto nos lleva a la Ley de Geotermia, el nuevo instrumento legislativo para regular a la industria geotérmica nacional.

³⁹¹ Gobierno de México, *Estrategia Nacional del Sector Eléctrico* (México: Gobierno de México, 2024), https://www.proyectosmexico.gob.mx/wp-content/uploads/2016/09/Estrategia-Nacional_Sector-El%C3%A9ctrico_x.pdf.

³⁹² IEA, *The Future of Geothermal Energy*, 2024, 31.

³⁹³ Gobierno de México, *Estrategia Nacional del Sector Eléctrico*, 2024.

B. Ley de Geotermia

El 18 de marzo de 2025 se decretaron ocho leyes secundarias de la Reforma Energética de Sheinbaum y se reformaron tres leyes existentes. Entre las leyes secundarias, dos corresponden únicamente a tipos de fuentes de energía: la Ley de Biocombustibles y la Ley de Geotermia. La LG sustituye a la Ley de Energía Geotérmica como la nueva base regulatoria para entender las posibilidades de desarrollo de la geotermia en México.

En términos generales, el objeto de la LG es prácticamente el mismo que el de la LEG: regular la exploración y explotación de recursos geotérmicos para su aprovechamiento. De igual manera, la LG también destina la mayoría de su contenido a la generación de electricidad y conserva el esquema de permisos de exploración y concesiones de explotación para regularla. Sin embargo, hay dos elementos de la LG que destacan en relación con la LEG.

En primer lugar, refuerza las posibilidades de promover el desarrollo geotérmico privado. Mientras la LEG buscó otorgar certeza jurídica a los privados, la LG también habla explícitamente de la necesidad de establecer incentivos para su desarrollo. En particular, la fracción XXVI del artículo séptimo señala como una de las atribuciones de la SENER lo siguiente:

“Establecer incentivos para el desarrollo de la energía geotérmica cuando generen mayores beneficios que otro tipo de energías renovables, principalmente en relación con la confiabilidad y seguridad del Sistema Eléctrico Nacional”³⁹⁴

Además del precedente jurídico que marca para fomentar el desarrollo geotérmico, cabe destacar que también incita a una evaluación más rigurosa de los beneficios que puede tener la geotermia en comparación a otros tipos de energía y, en específico, reconoce su cualidad de ser constante y, por consiguiente, su aporte a la

³⁹⁴ Gobierno de México, *Ley de Geotermia*, Diario Oficial de la Federación, 18 de marzo de 2025, 4. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGeo.pdf>

confiabilidad y seguridad del Sistema Eléctrico Nacional. Este es un paso relevante para superar el *lock-in* de las energías renovables que se discutió en el segundo capítulo.

El segundo elemento que resalta en comparación a la LEG, es que la nueva LG incorpora un entendimiento técnico de la geotermia más amplio y, en consecuencia, abre la posibilidad de más formas de aprovechamiento. En concreto, expande los esquemas de aprovechamiento de los usos diversos, señala al litio como un subproducto geotérmico y reconoce la posibilidad de cooperación con la industria petrolera. Lo anterior tiene implicaciones importantes para el futuro del desarrollo geotérmico en el país.

El Artículo 1 de la LG enuncia su objetivo. Desde allí se comienza a apreciar una inclusión mayor del potencial y aplicaciones técnicas de la geotermia:

<i>Tabla 12. Comparación del artículo 1 de LEG y LG</i>	
<i>LEG</i>	<i>LG</i>
Artículo 1. “La presente Ley es de interés y orden público, y tiene por objeto regular el reconocimiento, la exploración y la explotación de recursos geotérmicos para el aprovechamiento de la energía térmica del subsuelo dentro de los límites del territorio nacional, <i>con el fin de generar energía eléctrica o destinarla a usos diversos.</i> ” ³⁹⁵	Artículo 1. “La presente Ley es reglamentaria de los artículos 25, párrafo quinto, 27, párrafos cuarto y sexto y 28, párrafo cuarto, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, y tiene por objeto regular la Exploración y la Explotación de Recursos Geotérmicos para el aprovechamiento sustentable de la energía

³⁹⁵ México, *Ley de Energía Geotérmica*, Diario Oficial de la Federación, 11 de agosto, 2014., 1. Itálicas propias para enfatizar.

	<p>térmica del subsuelo dentro de los límites del territorio nacional, <i>con el fin de generar energía eléctrica o destinarla a Usos Diversos, o ambos.</i>³⁹⁶</p>
--	--

Que la LG incluya el fin “o ambos” reconoce la posibilidad de aplicaciones cascada y de más de un aprovechamiento a partir del mismo yacimiento. Esta es una buena señal, y la tendencia continúa al conocer los modos de aprovechamiento que dicta la LG.

i. Modos de aprovechamiento según la LG

La LG mantiene el diseño de aprovechamiento de la energía geotérmica que introdujo la LEG: el permiso de exploración y la concesión de explotación –para públicos y privados–. También crea los Permisos para Usos Diversos que regulan los usos directos dentro de áreas geotérmicas ya concesionadas. Sin embargo, introduce tres modos de aprovechamiento nuevos: el Aprovechamiento Geotérmico Exento (AGE), la reconversión de pozos petroleros para fines de aprovechamiento geotérmico y la explotación de litio u otros minerales estratégicos a partir de salmueras geotérmicas. Entre líneas, además de expandir las aplicaciones de la geotermia en México, los nuevos modos de aprovechamiento señalan una nueva apreciación de la geotermia: ya no sólo como tecnología de generación de electricidad, sino como fuente de energía que contribuye a la seguridad y soberanía energética y a mitigar la pobreza energética.

El AGE es “el aprovechamiento de Recursos Geotérmicos para destinarlos a Usos Diversos de pequeña escala, que está exento de un Permiso para Usos Diversos,

³⁹⁶ Gobierno de México, *Ley de Geotermia.*, 1. Itálicas propias para enfatizar.

pero que cuenta con un registro de esta actividad en la Secretaría³⁹⁷ La idea detrás los AGE es que personas o comunidades aprovechen los usos directos de la geotermia sin necesidad de tramitar permisos para hacerlo. En otras palabras, facilita enormemente el aprovechamiento al no tener que tramitar permisos. Además, este modo de aprovechamiento busca combatir la pobreza energética y asegurar justicia energética. Es una alternativa prometedora gracias al enorme potencial técnico de los usos directos en México. Con las medidas correctas, se podría tratar del comienzo de un desarrollo que sea potencia a nivel mundial.

“...[N]o me queda duda que nos volveremos potencia de su aprovechamiento a través de usos diversos. Así, poco a poco democratizaremos y descentralizaremos el acceso a la energía, en pro de la justicia energética, el combate a la pobreza energética, y claro que si, como no, en pro de la reducción de riesgo de desastres.”

Compartió el director de Coordinación de Estrategia de Energías Renovables de la SENER en la Apertura del XXXI Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana en mayo de 2025.

Dado que, hasta ahora, la geotermia en México se ha desarrollado a gran escala, el acercamiento a usos comunitarios es muy importante. A pesar de la abundancia de recursos geotérmicos en el país, muchas comunidades no conocen a fondo su potencial y cómo su aprovechamiento las puede beneficiar directamente. Además, la semejanza de la geotermia con otras actividades extractivas le ha dado una mala reputación en algunos lugares.³⁹⁸ Esto puede dificultar más el conocimiento de sus aplicaciones a pequeña escala. Sin embargo, hay esfuerzos recientes de acercarse

³⁹⁷ *Ibid.*, 1.

³⁹⁸ Charlemos de... “*Geotermia y Sociedad en México*”, Instituto de Geofísica, UNAM, video de YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=ocb9xYbQxaE>.

a comunidades geotérmicas, como Los Baños, Veracruz, para socializar a la geotermia y que asuman al recurso como suyo.³⁹⁹

La LG también reconoce e indica la reconversión de pozos petroleros para aprovechamiento geotérmico como una posibilidad de explotación. No elabora cómo hacerlo, sin embargo, es un cambio relevante en la apreciación de las posibilidades y versatilidad de las tecnologías geotérmicas. Además, incluye directamente a Pemex en el aprovechamiento geotérmico. Esto se alinea a los planes futuros de Pemex en convertirse en una empresa de energía, no sólo una empresa petrolera. En palabras de Víctor Rodríguez Padilla, director de Pemex, en la presentación del Plan Estratégico de Pemex el pasado 5 de agosto: “...también vamos a incursionar en las fuentes renovables. Energía solar, energía eólica a partir de las plataformas marinas, tenemos también algunos proyectos de geotermia...”⁴⁰⁰ Encima, agregó:

“...y, algo también que es muy importante: hemos localizado cinco formaciones importantes que nos van a permitir salmueras con una alta concentración de litio. Una de las instrucciones que nos ha dado la Presidenta de la República ha sido que Pemex se metiera a los materiales estratégicos mirando al futuro. Uno de ellos es el litio y entonces hemos ubicado cinco formaciones a las cuales tenemos una alta concentración de litio en esas salmueras y tenemos ya en desarrollo los proyectos iniciales para que después se conviertan en proyectos de tipo industrial.”⁴⁰¹

Las salmueras a las que se refiere son salmueras geotérmicas. La cita revela dos cosas. Primero, una instrucción presidencial de explotar los materiales estratégicos en territorio nacional. Esto se liga a preocupaciones de seguridad energética. Por lo tanto, la posibilidad de extraer litio u otros materiales de yacimientos geotérmicos le asigna un papel estratégico a la geotermia. En línea con

³⁹⁹ Véase: M. P. Jácome Paz y C. Rodríguez Gómez, “Geothermal Energy and Society in Mexico,” en *Geothermal Energy and Society*, eds. A. Manzella, A. Allansdottir y A. Pellizzone, Lecture Notes in Energy, vol. 67 (Cham: Springer, 2025).

⁴⁰⁰ Pemex: Plan Estratégico 2025-2030, canal Pemex, YouTube, 5 de agosto de 2025, video, <https://youtu.be/czxoYyfvRxQ>.

⁴⁰¹ *Ibid.*

lo anterior, la LG posibilita a los concesionarios la explotación de subproductos geotérmicos, con excepción del litio, cuya limitación se limita al Estado.⁴⁰²

ii. ¿Por qué una nueva ley?

El contenido y las facultades que otorga la nueva Ley de Geotermia sugieren por qué se hizo –en reemplazo de la Ley de Energía Geotérmica–. En primer lugar, se incluyen explícitamente más modos de aprovechamiento geotérmico. En otras palabras, el entendimiento técnico de la geotermia es más amplio en la nueva ley, más allá de la energía geotérmica. En segundo lugar, se reconoce que el aprovechamiento de la geotermia se alinea con objetivos de política energética nacional. En palabras de Claudia Gloria, la directora de Geotermia de SENER:

“Es fundamental señalar que las actividades que se realizan al amparo de esta ley deben de realizarse encaminadas, deben estar orientadas a los intereses del a los intereses nacionales tales como la seguridad energética, la sustentabilidad en las áreas, la protección al medio ambiente, el bienestar social, la atención a la pobreza energética y el impulso a la justicia energética.”

Además, se percibe una vuelta al reconocimiento de la historia y el potencial de la geotermia en México y, por consiguiente, su aporte a la soberanía energética:

“Cabe resaltar [...] que la geotermia se hace con calor que es nuestro. Estamos en un momento geopolítico algo tenso en el cual, pues nuestra generación de electricidad a base de combustibles importados nos pone en una situación complicada. Sin embargo, la geotermia nace con recurso

⁴⁰² Gobierno de México, *Ley de Geotermia.*, 5.

nacional, con tecnología que se genera en México, con investigación que se genera en México, con investigadores e investigadoras que se generan en México.”⁴⁰³

También se valoran sus ventajas técnicas:

“La geotermia nos permite tener esta independencia energética y esta resiliencia energética que va a poder hacer que nos desprendamos un poco de estos riesgos inherentes de la coyuntura política que puede ser muy cambiante de un día para otro.”⁴⁰⁴

Respecto al *carbon lock-in*, la LG es un paso a seguir para escapar del *lock-in* tecnológico institucional de la energía geotérmica en el país. Si se quieren impulsar los usos directos a gran escala, el precedente positivo de la experiencia del Estado con la energía geotérmica puede servir como guía para fomentar los usos diversos. Sin embargo, aunque estos son avances prometedores y abren camino para los nuevos modos de aprovechamiento que señala la LG, quedan oportunidades a futuro para la geotermia mexicana. A continuación, se discuten.

C. Oportunidades de la geotermia a futuro

Los caminos que abre y continúa la LG son prometedores, sin embargo, aún queda mucho por hacer para expandir el desarrollo de la geotermia en México. Un punto de partida es trabajar sobre lo que ya se conoce y sobre las herramientas que ya se han desplegado en el pasado. La CFE ya tiene registros con zonas de altos potenciales para generación de electricidad. Los centros de investigación especializados en geotermia también publican constantemente sobre posibilidades de aprovechamiento.

⁴⁰³ Jesús Eduardo Robles Chávez, director de Coordinación de Estrategia de Energías Renovables, SENER, Apertura del XXXI Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana, Cuernavaca, 22 de mayo de 2025.

⁴⁰⁴ *Ibid.*

Un primer paso podría ser incorporar su investigación al diseño de las políticas públicas que afecten a la geotermia.

Otro tipo de oportunidades es analizar detalladamente cómo la geotermia se puede alinear con otras metas nacionales de desarrollo. Una opción es explorar la intersección entre el Plan México y la geotermia. El Plan incluye al sector energía en distintos puntos, tanto de manera directa así como indirecta. No menciona a la geotermia ni a otras tecnologías energéticas particulares. Sin embargo, el desarrollo de la industria geotérmica nacional encaja con partes del plan de una manera simbiótica. En otras palabras, es posible vincular objetivos del Plan con factores necesarios para expandir el desarrollo geotérmico. Por ejemplo, un mayor desarrollo de geotermia para usos eléctricos, directos e industriales se alinea con los todos los elementos de la Misión del Plan México: “Plan de largo plazo para el desarrollo del país”; “Promover la relocalización”; “Elevar el contenido nacional y regional. Sustitución de importaciones”; “Relanzar el programa ‘Hecho en México’”; “Crear empleos [...] en sectores manufactura y servicios”; “Incrementar proveeduría local de más valor”; “Fortalecer el desarrollo científico, tecnológico y la innovación”; “Ampliar el acceso a la educación media superior y su vínculo al plan de desarrollo”; “Promover los polos de desarrollo y de bienestar a partir de vocaciones regionales” e “Impulso a la integración del continente.”⁴⁰⁵ Ahora bien, si vinculamos a la geotermia con los puntos de misión del Plan, nos queda algo así:

⁴⁰⁵ Gobierno de México, *Plan México* (México: Gobierno de México, 2025), 2.

<i>Tabla 13. Posibles vínculos entre la misión del Plan México y el desarrollo de la geotermia⁴⁰⁶</i>	
<i>Misión Plan México</i>	<i>Misión en vinculación con la geotermia</i>
Plan de largo plazo para el desarrollo del país	La geotermia necesita visión a largo plazo. Sus inversiones son a largo plazo.
Promover la relocalización	Se pueden relocalizar procesos productivos a áreas con alto potencial geotérmico.
Elevar el contenido nacional y regional. Sustitución de importaciones	Energía producida con recursos nacionales, con <i>know how</i> nacional. Usos directos para procesos industriales.
Relanzar el programa ‘Hecho en México	Asociar a la geotermia en discursos promotores de soberanía nacional.
Crear empleos bien remunerados en sectores manufactura y servicios	Fomentar los usos directos con aplicaciones industriales y fomentar los usos de balneología. Ambos se pueden combinar en aplicaciones cascada.
Incrementar proveeduría local de más valor	Utilizar aplicaciones cascada y usos directos en cadenas de valor agrícolas. Posibilidad de deshidratación de superávits de producción.
Ampliar el acceso a la educación media superior y su vínculo al plan de desarrollo	Ampliar programas educativos que sirvan a la industria geotérmica. Atender crecimiento de demanda de personal nacional e internacional.
Fortalecer el desarrollo científico, tecnológico y la innovación	Fortalecer la innovación e investigación geotérmica en el país. Aplicar las innovaciones nacionales.
Impulso a la integración del continente.	Apoyar y orientar a otros países latinoamericanos en el desarrollo de sus industrias geotérmicas –Centroamérica y el oeste de Sudamérica tienen un potencial muy alto–. Retomar la colaboración con la industria geotérmica estadounidense y acercarse a la canadiense.
Promover los polos de desarrollo y de bienestar a partir de vocaciones regionales	Promover polos y desarrollo geotérmico regional. Se podría hacer una estrategia de desarrollo regional en los estados que forman parte del Cinturón Volcánico Transmexicano.

La tabla comparte algunas posibilidades para alinear a la geotermia con el Plan México.

Otra área de oportunidad es el desarrollo privado de la geotermia. Ya existen las disposiciones para que las empresas incurran en la energía geotérmica. Sin embargo, la trayectoria de los privados en geotermia hasta ahora da poca confianza al sector. Se debe reforzar la confianza con el cumplimiento de las responsabilidades de

⁴⁰⁶ Elaboración propia con información de *Ibid.*

las autoridades que dicta la ley. Un modo de construir confianza podría ser mediante los esquemas de desarrollo público privados que permite la Reforma de 2024. Como se mencionó, desarrollos así han sido muy exitosos en la industria geotérmica de Indonesia. Aunado a esto, se podrían fomentar empresas que se especialicen en usos directos, que hasta ahora son muy escasas en el país. Asimismo, se podrían relanzar programas de financiamiento para mitigar el riesgo de las primeras etapas de geotermia. La inversión es una constante para fomentar el desarrollo, sobre todo frente a las nuevas tecnologías de generación geotermoeléctrica. A nivel internacional, se calcula que se necesitan más de 1 billón de dólares para 2035 y más de 2.8 billones para 2050 para desarrollar todo el potencial de mercado de la geotermia no convencional.⁴⁰⁷ En su auge, la inversión anual que se necesitaría es de 200 mil millones de dólares al año para 2035. Esta cantidad equivale a un cuarto de la actual inversión anual en energías limpias.⁴⁰⁸

Por último, un área de oportunidad de suma importancia es la aceptación social de la geotermia. La aceptación debe de buscarse con un enfoque local y comunitario. De este modo, las personas conocen a la geotermia –muchos mexicanos no la identifican como una fuente de energía en el país–, y aprenden sobre los beneficios que le podría dar a su comunidad. El trabajo del Instituto de Geofísicas de la UNAM liderado por Mariana Patricia Jácome Paz y Cecilia Rodríguez Gómez acerca de comunidades geotérmicas representa un proyecto ejemplar de cómo aumentar la aceptación de la geotermia en el país.⁴⁰⁹ Sobre esta línea, los AGE son una buena herramienta para promover la aceptación y desarrollo de la geotermia.

⁴⁰⁷ IEA, *The Future of Geothermal Energy*, 77.

⁴⁰⁸ *Ibid.*

⁴⁰⁹ Jácome Paz y Rodríguez Gómez, “Geothermal Energy and Society in Mexico.”

Conclusiones

Como reflexión final, México tiene un buen pronóstico para expandir su industria geotérmica nacional. Sin embargo, está por verse cómo se implementa la nueva regulación geotérmica y qué oportunidades de aprovechamiento se ejecutan. Hay muchas preguntas acerca de los pasos específicos a seguir para expandir la geotermia. Por ejemplo, durante la presentación de la LG en el XXXI Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana en mayo de 2025, un profesor del Instituto de Geofísicas de la UNAM preguntó a los representantes de SENER cuánto se planeaba expandir la capacidad instalada de la energía geotérmica en el país. La respuesta fue ambigua e indicó que esta cifra no se conoce a ciencia cierta, o al menos no es pública.

No obstante, los avances tecnológicos de la industria a nivel mundial aunados a los instrumentos de aprovechamiento que introdujo la LG expanden el potencial geotérmico del país. La coincidencia temporal de ambos abre caminos que antes no se contemplaban y, junto con el alineamiento de la geotermia con objetivos de política energética, cada vez es más posible que se cierre la brecha entre el potencial geotérmico de México y su desarrollo actual.

Conclusión

“México está lleno de recursos geotérmicos. Tenemos recursos geotérmicos muy importantes, muy grandes que son esencialmente explotados en CFE. Pero también tenemos recursos de media temperatura y muchos bancos de baja temperatura, entonces tenemos que enfocar también nuestros esfuerzos y nuestras políticas también para poder promover el aprovechamiento de esos recursos.”

- Juan Ignacio Martínez Estrella,
Presidente de la AGM. Apertura del
XXXI Congreso Anual de la
Asociación Geotérmica Mexicana,
Cuernavaca, 22 de mayo de 2025.

El desarrollo geotérmico en México tiene una larga trayectoria marcada por diversas etapas y estrategias de fomento. Es una fuente de energía peculiar con la paradoja de tener un gran potencial nacional y, al mismo tiempo, ser poco conocida e impulsada. Además, la brecha entre su potencial y capacidad instalada es una constante en sus más de setenta años de desarrollo en el país. El objetivo de esta tesis fue conocer las causas que explican su poco desarrollo a pesar de su potencial. En conjunto, los resultados de los capítulos permiten decantar cuatro hallazgos globales expuestos a continuación. Por lo tanto, para concluir la investigación, se discuten los hallazgos, limitaciones finales y posibles vías de investigación que surgen de la tesis.

I. Hallazgos

A. El Estado al mando de la geotermia, oportunidades pendientes para el sector privado

La mayor parte de la capacidad instalada de energía geotérmica en el país se desarrolló durante la segunda mitad del siglo XX, cuando el Estado dominaba en su totalidad la generación eléctrica nacional. Sin embargo, con el paso de los años ha

habido momentos en los que se ha impulsado una mayor participación del sector privado en la geotermia. A inicios del 2010, Grupo Dragón forjó su propio camino para comenzar la construcción del Domo de San Pedro. En ese momento, el Grupo fue ingenioso para conseguir la exclusividad jurídica sobre los yacimientos geotérmicos que aprovechan; una situación que la Ley de Energía Geotérmica atendió en el 2014 para abrirle expresamente la puerta a los privados. La LEG fue exitosa en atraer más de 500 millones de dólares de inversión pública y privada, sin embargo, ninguno de los proyectos privados propuestos se concretaron. En gran medida, el freno a la geotermia privada se provocó por la apatía de la administración de López Obrador hacia las energías renovables. En consecuencia, a pesar de la existencia de mecanismos para que el sector privado invirtiera en geotermia, de facto, el desarrollo geotérmico quedó sujeto a la voluntad del Estado.

Sin embargo, la nueva Ley de Geotermia emitida con la Reforma energética de 2024 reitera su compromiso de incentivar el desarrollo geotérmico privado. Además de otorgar certeza jurídica, la LG indica que la Secretaría de Energía debe incentivar el desarrollo geotérmico, tanto para públicos como privados. La LG también señala otros modos de aprovechamiento geotérmico además de la generación de electricidad y los usos diversos. En concreto, señala la posibilidad de reconversión de pozos petroleros a pozos geotérmicos; la extracción de litio de salmueras geotérmicas y los modos de aprovechamiento directo exentos de permisos. Los primeros dos nuevos modos de aprovechamiento mantienen la exclusividad del Estado, sin embargo, el tercero extiende las posibilidades para que el sector privado invierta en aplicaciones directas de la geotermia, además de en generación de electricidad. En todo caso, comienzan a haber resultados positivos para la inversión en energía geotérmica. Por

ejemplo, el 1 de septiembre de 2025 se le otorgó una concesión geotérmica a ENAL, filial de Grupo Carso.⁴¹⁰

B. Distintas razones de justificación de desarrollo, distintos niveles de fomento

En la historia de la geotermia en México, distintas razones han justificado su desarrollo como fuente de energía. Estas razones respondieron a necesidades energéticas de distintos momentos, por ejemplo, qué prioridades de política energética se han tenido. Cronológicamente, se aprecia que la geotermia se ha fomentado con las siguientes justificaciones: 1) contribuir al suministro eléctrico 2) ser una energía baja en carbono 3) seguridad energética. Cada razón no ha sustituido la anterior, sino que se añade a las razones expresadas para fomentarla. En seguida se desarrolla cada justificación.

El objetivo de política energética que sustenta y supera a todos los demás es atender la demanda energética y eléctrica. De acuerdo con él, en un inicio el desarrollo de la geotermia en México se impulsó para robustecer las tecnologías nacionales de generación de electricidad y contribuir al suministro eléctrico. Por lo tanto, es lógico que después de su auge y consolidación en CFE no se priorizara el desarrollo de la geotermia frente a otras alternativas de generación de electricidad más baratas y menos riesgosas, en particular las fósiles.

Sin embargo, con el paso de los años la geotermia se asoció con causas medioambientales y climáticas por su calidad de energía baja en carbono y renovable.

⁴¹⁰ Oscar Llamasa Ardila, “México otorga concesión geotérmica para el área de Celaya, Guanajuato,” *PiensaGeotermia*, 2 de septiembre de 2025, <https://www.piensageotermia.com/mexico-otorga-concesion-geotermica-para-el-area-de-celaya-guanajuato/>

En México, se han reconocido sus beneficios ambientales desde inicios del siglo XXI. De manera relacionada, se ha impulsado a la geotermia junto con otras renovables durante las Reformas Energéticas de 2013 y 2024. Sin embargo, el impulso que se le puede atribuir a su asociación con la transición energética es limitado. Paradójicamente, la mayor parte del desarrollo geotérmico nacional ocurrió antes de la popularización del cambio climático.

En última instancia, en tiempos recientes a la conclusión de esta investigación el gobierno ha justificado el desarrollo geotérmico con motivos de seguridad y soberanía energética. Públicamente, se apela a la particularidad del territorio mexicano para aprovecharla, se señalan los usos directos como una posibilidad de aprovechamiento comunitario a pequeña escala con enfoque social y se contemplan las posibilidades de Pemex para aprovechar usos geotérmicos eléctricos y de explotación de minerales. Asimismo, a puerta cerrada, representantes de la SENER señalan a la geotermia como una fuente que puede contribuir a reducir la dependencia energética de México hacia EEUU por las importaciones de gas. No obstante, los resultados del fomento de la geotermia con razones de seguridad y soberanía energética están pendientes de observarse.

C. El carbon lock-in y la geotermia

Una de las razones principales para explicar los límites del desarrollo de la geotermia en México es la presencia de *carbon lock-in* en el sector energético y eléctrico mexicano. Simplemente, las mayores inversiones de infraestructura, las políticas públicas, la educación técnica especializada e incluso la cultura energética nacional está orientada hacia los hidrocarburos. Visto de otro modo, a México se le dificulta desarrollar energías bajas en carbono por ser país petrolero. Esto no significa que sea

imposible, sin embargo impone resistencias adicionales ante el desarrollo de otras fuentes de energía, entre ellas la geotermia.

Además, como se expuso en el tercer capítulo, existe un *lock-in* tecnológico e institucional de la energía geotérmica en CFE, lo cual ha limitado el desarrollo de otros usos de la geotermia distintos al eléctrico. Esto se debe a la presencia de la CFE como la institución que más ha desarrollado y hasta la fecha ha controlado la mayoría de la geotermia nacional, sin flexibilidad institucional para acoger prolongadamente otros usos de la geotermia. Como se mencionó, a fin de cuentas, la geotermia se desplegó por su aporte al suministro eléctrico en el país. El *lock-in* tecno institucional retroalimentó *lock-ins* conductuales que a su vez limitaron el desarrollo de la energía.

Durante el siglo XXI han habido cambios que apuntan hacia la posibilidad de superar algunos de los efectos del *carbon lock-in* en la geotermia y del *lock-in* tecno-institucional de la energía geotérmica en CFE. Notoriamente, las Reformas energéticas de 2013 y 2024 y, en especial, la Ley de Energía Geotérmica y Ley de Geotermia, respectivamente, han creado mecanismos que incentiven el desarrollo geotérmico en modalidades privadas y de otros modos de aprovechamiento. Los mecanismos que acompañaron a la LEG tuvieron resultados limitados. Sin embargo, los de la LG parecen ser prometedores, sobre todo por su alineación con la soberanía energética y por la priorización que la presidencia de Sheinbaum ha dado a la transición energética.

D. Oportunidades para desbloquear el potencial: innovaciones tecnológicas y precedentes históricos

Independientemente del grado de desarrollo de la geotermia en México, su potencial nacional es permanente dadas las condiciones geológicas del territorio. De hecho, los

alcances tecnológicos de innovaciones recientes en geotermia no convencional lo expanden. Por consiguiente, como se presentó en el quinto capítulo, la nueva ola de tecnologías amplía las posibilidades de desarrollo de la geotermia en México. Aún faltan estrategias concretas para desarrollar los sistemas no convencionales. Sin embargo, la trayectoria del desarrollo de la geotermia hasta el presente aporta lecciones importantes que indican buenas prácticas de fomento e implementación tecnológica, sea para geotermia convencional, no convencional u otros usos de la geotermia. En específico, las tendencias que lograron el auge de la energía geotérmica para finales del siglo XX fueron: 1) liderazgos fuertes, 2) creación de una base institucional, 3) grandes inversiones en exploración de campos geotérmicos y en construcción de plantas geotermoeléctricas, 4) formación de personal para la consolidación de un capital humano nacional especializado en geotermia y 5) cooperación internacional a propósito de asistencias técnicas y mejora tecnológica. Estos factores sirven para sentar precedente de buenas prácticas para un buen desarrollo y posiblemente para otra ola de fomento. Sobre esta línea, las nuevas vías de desarrollo que posibilita la LG podrían representar un punto de partida a futuro.

II. Límites y posibles vías de investigación

En el segundo capítulo se señalaron los límites metodológicos de la investigación. A modo de recapitulación, la magnitud de la investigación, la curva de aprendizaje de los temas tratados y algunos retos académicos, profesionales y personales de la autora tuvieron costos metodológicos en la tesis, particularmente el número total de entrevistas realizadas.

De igual manera, el segundo capítulo también señala el límite de enfocarse primordialmente en la capacidad instalada como indicador de desarrollo de la

geotermia. Se reconoce que existen otros factores, técnicos y sociales, que indican el desarrollo de una tecnología; por ejemplo, para el caso específico de la geotermia, las redes de transmisión y distribución nacional de electricidad. Explorar más a fondo el papel de otros indicadores y elementos necesarios para el desarrollo es una vía de investigación posible.

Asimismo, a lo largo de la investigación se señalan continuamente semejanzas técnicas entre la energía geotérmica y la industria petrolera o de hidrocarburos en general, sobre todo en sus etapas de exploración y construcción de plantas. Los procesos de excavación de pozos son similares y, por lo tanto, algunos de los riesgos técnicos o retos de desarrollo a los que se enfrentan ambas industrias también. Se mencionó el caso de la incertidumbre de conocer la calidad de los yacimientos y de los altos costos de excavación. Sin embargo, una diferencia clave entre la geotermia y el petróleo es que tanto se desincentiva cada industria frente a los retos similares que enfrenta. Para la geotermia el riesgo de exploración y los altos costos al inicio de los proyectos desincentivan significativamente interés en su desarrollo y la planeación de proyectos de plantas geotermoeléctricas. En cambio, para el petróleo estos retos no son significativos. De igual manera, la extracción de recursos geotérmicos y fósiles puede inducir sismicidad. Una vez más, esto representa una barrera para la geotermia por cómo afecta su aceptación social pero no es un freno para los hidrocarburos. La tesis no explora por qué hay disparidad entre qué tanto afectan los retos en las distintas industrias. Sin embargo, es aparente que la diferencia entre las rentas de cada industria es clave para explicar la diferencia. Ahora bien, posibles vías de investigación podrían explorar por qué la geotermia tiene tantos retos mientras otras renovables que tampoco son rentables sí se desarrollan.

Otro límite tiene que ver con las razones que se identifican como posibles puntos de partida de más desarrollo geotérmico. El reconocimiento de las razones detrás de la brecha entre potencial y desarrollo como los factores institucionales, el *carbon lock-in* y las limitaciones de las leyes geotérmicas son útiles para entender qué se necesita para fomentar más la geotermia. De igual manera, la presentación de la naturaleza técnica de la geotermia y los beneficios que ofrecen sus cualidades señalan retos y posibilidades inherentes del desarrollo de la geotermia. Sin embargo, planes para fomentar a la geotermia requieren evaluaciones locales rigurosas. Por lo tanto, aunque la tesis analiza el caso de la geotermia en México desde una perspectiva macro, estrategias de desarrollo requieren evaluaciones locales rigurosas y transversales entre lo técnico, económico, político y social para evaluar la factibilidad de la geotermia en cada caso.

Además, como se ha comentado, las nuevas medidas de política energética del gobierno de Claudia Sheinbaum, entre ellas la nueva Ley de Geotermia, comienzan a movilizar el sector geotérmico nacional. Por lo tanto, hay actualizaciones constantes que se podrían incluir en la tesis. En el proceso de finalización de la misma se ha hecho un esfuerzo por incluirlas. Sin embargo, debido a la naturaleza continua de las políticas públicas, puede que los eventos más recientes en el sector geotérmico nacional no se incluyan en el texto final de la investigación. Se recomienda consultar la página web “Piensa en Geotermia” o su versión anglófona “ThinkGeoEnergy” así como medios de información especializados en energía para saber las actualidades de la geotermia.

Como última reflexión, independientemente de si la geotermia se incluya o no en la agenda de política energética, su potencial es intrínseco al territorio nacional y

sus características tecnológicas tienen beneficios teóricos evidentes. Por lo tanto, una gran pregunta para investigaciones posteriores no es cómo o cuándo se va a aprovechar este potencial, sino qué justificación y estrategia se utilizará cuando se quiera aprovechar al máximo la geotermia mexicana.

Bibliografía

- Apajalahti, Eeva-Lotta, y Gregor Kungl. “Path Dependence and Path Break-Out in the Electricity Sector.” *Environmental Innovation and Societal Transitions* 43 (2022): 220–236.
- Araújo, Kathleen M. “A Roadmap for Concepts and Theory of Energy Transitions.” En *Routledge Handbook of Energy Transitions*, editado por Kathleen M. Araújo. Londres: Routledge, 2022.
- . “French Nuclear Energy.” En *Low Carbon Energy Transitions*, 81–112. Oxford: Oxford University Press, 2017.
- . *Low Carbon Energy Transitions: Turning Points in National Policy and Innovation*. New York: Oxford University Press, 2017.
- . ed. *Routledge Handbook of Energy Transitions*. 1st ed. Abingdon, Oxon: Routledge, 2022.
- Aristegui Noticias. “Conferencia ‘mañanera’ de Claudia Sheinbaum: 06/11/24.” YouTube video. Publicado el 6 de noviembre de 2024. Consultado el 10 de julio de 2025. https://www.youtube.com/watch?v=Sf8ov_sAuZE&t=299s&ab_channel=AristeguiNoticias.
- Armstead, Christopher H. *Geothermal Energy: Its Past, Present, and Future Contributions to the Energy Needs of Man*. Londres: Halsted Press, 1978.
- , ed. *Geothermal Energy: Review of Research and Development*. París: UNESCO, 1973.

- Asociación Geotérmica Mexicana (AGM). “Acerca de nosotros.” En *AGM*. Sitio web. Última actualización 10 de octubre de 2024. Consultado el 10 de julio de 2025. <https://geotermia.org.mx/agm/>.
- Ausubel, Jesse H. “Regularities in Technological Development: An Environmental View.” En *Technology and Environment*, editado por Jesse H. Ausubel y Hedy E. Sladovich. Washington, DC: National Academy Press, 1989.
- Axelsson, G., et al. “Sustainable Management of Geothermal Resources and Utilisation for 100–300 Years.” En *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005*. Antalya, Turquía, 24–29 de abril de 2005.
- Bajracharya, Tri Ratna, Shree Raj Shakya, y Anzoo Sharma. “Chapter 2 - Dynamics of Energy Security and Its Implications.” En *Handbook of Energy and Environmental Security*, editado por Muhammad Asif, 13–25. Cambridge, MA: Academic Press, 2022.
- Battocletti, E., y W. Glassley. *Measuring the Costs and Benefits of Nationwide Geothermal Heat Pump Deployment*. Bob Lawrence & Associates, Inc., 2013.
- Berkhout, Frans. “Viewpoint: Technological Regimes, Path Dependence and the Environment.” *Global Environmental Change* 12, no. 1 (2002): 1–4.
- Bertani, Ruggero, y E. Green. “Long-Term Projections of Geothermal-Electric Development in the World.” En *Proceedings of the GeoTHERM Congress*. Offenburg, Alemania, 2009.

Beck, H. P., Z. Hou, Q. Wang, et al. “The German Energy Transition after the Russia-Ukraine War – Challenges and Opportunities.” *Carbon Neutral Systems* 1 (2025).

Bentley Systems. *Bentley Infrastructure 500: Top Owners 2023 Edition*. Exton, PA: Bentley Systems, 2023.
<https://www.bentley.com/wp-content/uploads/top-500-2023.pdf>.

Birkle, Peter. “Development of Geothermal Energy in México and Its Energetic Potential for the Future.” En *Towards a Cleaner Planet*, editado por Juan Klapp, Jorge L. Cervantes-Cota y José F. Chávez Alcalá. Berlin y Heidelberg: Springer, 2007.

Blodgett, L., y K. Slack. *Basics of Geothermal Energy Production and Use*. San Diego, CA: Global Energy Network Association, 2009.

Casten, Thomas R. *Turning Off the Heat*. Amherst, NY: Prometheus Books, 1998.

Centro Mexicano para la Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE-Geo). “Quiénes somos.” *CEMIE-Geo*. Consultado el 18 de agosto de 2025.
<https://cemiegeo.org/index.php/quienes-somos>.

Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). “*Gráfica de Demanda*.” Demanda bruta nacional del 18 de agosto de 2025. CENACE. Consultado el 18 de agosto de 2025. <https://www.cenace.gob.mx/graficademanda.aspx>.

Cholteeva, Yulia. “The State of UK Tidal Energy.” *Power Technology*. 2021. Consultado el 27 de agosto de 2022.
<https://www.power-technology.com/analysis/uk-tidal-development/>

- Christensen, Clayton M. *The Innovator's Dilemma*. Cambridge, MA: Harvard Business Press, 1997.
- Codwell, Pedro Joaquín. “Prólogo.” En *Para entender la reforma al sector eléctrico*, por Enrique Ochoa Reza, 11–12. México: Producciones Sin Sentido Común, 2015.
- Comisión Europea. “Advanced Geothermal System for Deep Geothermal Heat and Power Production.” Consultado el 3 de diciembre de 2024. <https://cordis.europa.eu/project/id/727550>.
- Comisión Federal de Electricidad. (CFE) “Historia.” Consultado el 1 de octubre de 2024. <https://www.cfe.mx/nuestraempresa/pages/historia.aspx>.
- . “México, potencia en geotermia.” *Boletín de la CFE* 2502. Acceso 20 de mayo de 2025. <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2502>
- Congreso de la Unión, Cámara de Diputados. *Ley del Sector Eléctrico*. Promulgada el 18 de marzo de 2025.
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). *Soberanía energética, autosuficiencia y sustentabilidad*. Pronaces ECC – Política Energética. Reporte ejecutivo. 11 de abril de 2022.
- Cooper, Arnold C., y Dan Schendel. “Strategic Responses to Technological Threats.” *Business Horizons* 19, no. 1 (1976): 61–69.
- Department for Energy Security and Net Zero, y Department for Business, Energy & Industrial Strategy. “Wave and tidal energy: part of the UK’s energy mix.”

GOV.UK. Publicado el 22 de enero de 2013. Consultado el 9 de noviembre de 2025.

<https://www.gov.uk/guidance/wave-and-tidal-energy-part-of-the-uks-energy-mix>

Diario Oficial de la Federación. *Plan Nacional de Desarrollo, 2007–2012*.

Diccionario del español de México (DEM), *Geotermia*, Colegio de México, 10 de julio de 2025, <https://dem.colmex.mx/Ver/geotermia>.

DiPippo, Ronald. “Pathé Geothermal Power Plant, Hidalgo, Mexico: A Comprehensive Retrospective Assessment of the First Plant of Its Kind in the Americas.” *Geothermics* 98 (2022): 1–21.

Dogru, Tarik, Umit Bulut, Emrah Kocak, Cem Isik, Courtney Suess y Ercan Sirakaya-Turk. “The Nexus between Tourism, Economic Growth, Renewable Energy Consumption, and Carbon Dioxide Emissions: Contemporary Evidence from OECD Countries.” *Environmental Science and Pollution Research* 27, n.º 32 (2020): 40930–48.

Dowd, A.-M., et al. “Geothermal Technology in Australia: Investigating Social Acceptance.” *Energy Policy* 39 (2011): 6301–6307.

Earle, Steven. *Physical Geology*. 2a ed. Victoria, B.C.: B.C. Campus, 2019. Cap. 9.2, “The Temperature of Earth’s Interior.” <https://opentextbc.ca/geology/chapter/9-2-the-temperature-of-earths-interior/>.

- Eitan, Avri, y Marko P. Hekkert. “Locked in Transition? Towards a Conceptualization of Path-Dependence Lock-Ins in the Renewable Energy Landscape.” *Energy Research & Social Science* 106 (2023): 2–14.
- Ellickson, Robert C. “Legal Sources of Residential Lock-ins: Why French Households Move Half as Often as U.S. Households.” *University of Illinois Law Review* (2012): 373.
- Elzen, Boelie, y Anna Wieczorek. “Transitions towards Sustainability through System Innovation.” *Technological Forecasting and Social Change* 72, no. 6 (2005): 651–661.
- Energy Observer. “Geothermal Energy, Powered by Earth.” Consultado el 27 de julio de 2024. <https://www.energy-observer.org/resources/geothermal-energy>.
- Fioretos, Orfeo, Tulia G. Falleti y Adam Sheingate, eds. *The Oxford Handbook of Historical Institutionalism*. Oxford: Oxford University Press, 2016; edición en línea, Oxford Academic, 2 de mayo de 2016.
- Flores Armenta, Magaly. “La Energía Geotérmica: Futuro de las Energías Limpias en México.” *Perspectivas Energéticas* 6, no. 13 (enero–mayo de 2022): 7.
- Flores-Armenta, Magaly, y Luis C. A. Gutiérrez-Négrin. “Geothermal Activity and Development in Mexico.” Presentado en *Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants*, organizado por UNU-GTP y LaGeo, Santa Tecla, El Salvador, 16–22 de enero de 2011.
- Geels, Frank W., y Johan Schot. “The Dynamics of Transitions: A Socio-Technical Perspective.” En *Transitions to Sustainable Development: New Directions in the*

Study of Long Term Transformative Change, editado por Jan Grin, John Rotmans y Johan Schot, parte I. Londres: Routledge, 2010.

Geels, Frank W. “From Sectoral Systems of Innovation to Socio-Technical Systems: Insights about Dynamics and Change from Sociology and Institutional Theory.” *Research Policy* 33, núms. 6–7 (2004): 897–920.

Gobierno de México. *Estrategia Nacional del Sector Eléctrico*. México: Gobierno de México, 2024.
https://www.proyectosmexico.gob.mx/wp-content/uploads/2016/09/Estrategia-Nacional_Sector-El%C3%A9ctrico_x.pdf.

———. *Ley de Energía Geotérmica*, Diario Oficial de la Federación, 11 de agosto de 2014.

———. *Ley de Geotermia*. Diario Oficial de la Federación, 18 de marzo de 2025.
<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGeo.pdf>.

———. *Plan México*. México: Gobierno de México, 2025.
https://www.planmexico.gob.mx/assets/pdf/Plan_Mexico_PrimerBorrador.pdf.

———. *Presidenta presenta 51 proyectos de electricidad del Plan de Fortalecimiento y Expansión del Sistema Eléctrico Nacional 2025–2030*. Presidencia de la República, 5 de febrero de 2025.
<https://www.gob.mx/presidencia/prensa/presidenta-presenta-51-proyectos-de-el-ectricidad-del-plan-de-fortalecimiento-y-expansion-del-sistema-electrico-nacional-2025-2030>.

- Goldstein, Bernard, et al. "Geothermal Energy." En *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, editado por Ottmar Edenhofer et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- Grübler, Arnulf. *The Rise and Fall of Infrastructures*. Heidelberg: Springer, 1990.
- Grupo Dragón. *Temas y Preguntas DSP*. Documento proporcionado en comunicación personal.
- Gutiérrez Negrín, Luis Carlos. "Usos directos de la geotermia: un potencial desaprovechado en México." *e-Management*, 7 de septiembre de 2017. <https://e-management.mx/2017/09/07/usos-directos-de-la-geotermia-un-potencial-desaprovechado-en-mexico/>.
- Gutiérrez-Negrín, Luis C. A., y Marcelo J. Lippmann. "México: En Memoria de Héctor Alonso Espinosa." *Revista Geotermia* 30, no. 2 (2017): 45–46.
- Gutiérrez-Negrín, Luis C. A., Germin R. Ramírez-Silva, Mario Martínez-Máñez, y Carlos López-López. "Hydrographic Characterization of the La Primavera, Mexico, Geothermal Field." *Geothermal Resources Council Transactions* 26 (2002): 1–8.
- Henderson, Rebecca, y Kim Clark. "Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms." *Administrative Science Quarterly* 35, no. 1 (1990): 9–30.
- Hernández Galán, José Luis. *El Aprovechamiento de la Energía de la Tierra*. Manuscrito proporcionado por el autor.

Hernández Ochoa, César Emiliano. *Reforma energética electricidad*. 1a ed. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica, 2018.

Hiriart Le Bert, Gerardo. *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*. Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía. México, DF, mayo de 2011.

———. *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*. Presentación de diapositivas, Comisión Reguladora de Energía (CRE). Sin fecha.
<https://www.cre.gob.mx/documento/2027.pdf>

Huttrer, G. W. *Geothermal Power Generation in the World 2015–2020 Update Report*. *World Geothermal Congress*. Reykjavik: International Geothermal Association, 2020.

Immergut, Ellen M. “The Theoretical Core of the New Institutionalism.” *Politics & Society* 26, no. 1 (March 1998): 5-34.

Instituto de Geofísica, UNAM. *Charlemos de... “Geotermia y Sociedad en México”*. Video de YouTube. Duración 58:46. Publicado por Instituto de Geofísica, UNAM. <https://www.youtube.com/watch?v=ocb9xYbQxaE>.

Instituto de Ingeniería. *Revista Digital Universitaria*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Accedido el 25 de febrero de 2025.
<https://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art49/curriculum.htm>.

International Energy Agency (IEA). *The Future of Geothermal Energy*. Paris: IEA, 2024. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy>.

———. “Mexico — Energy mix.” IEA. Consultado el 3 de octubre de 2025.
<https://www.iea.org/countries/Mexico/energy-mix>.

———. *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. Paris: IEA, 2021.
<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.

International Renewable Energy Agency (IRENA). *Global Geothermal Market and Technology Assessment*. Consultado el 29 de julio de 2024.
<https://www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global-geothermal-market-and-technology-assessment>.

———. *Renewable Power Generation Costs in 2022*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2023.

Islas, Jorge. “Getting Round the Lock-In in Electricity Generating Systems: The Example of the Gas Turbine.” *Research Policy* 26, no. 1 (1997): 49–66.

Jácome Paz, M. P., y C. Rodríguez Gómez. “Geothermal Energy and Society in Mexico.” En *Geothermal Energy and Society*, editado por A. Manzella, A. Allansdottir y A. Pellizzone. *Lecture Notes in Energy*, vol. 67. Cham: Springer, 2025.

Kemp, René, Johan Schot, y Remco Hoogma. “Regime Shifts to Sustainability through Processes of Niche Formation: The Approach of Strategic Niche Management.” *Technology Analysis & Strategic Management* 10, no. 2 (1998).

Kemp, René, y Luc Soete. “The Greening of Technological Progress: An Evolutionary Perspective.” *Futures* 24, no. 5 (1992).

- Kim, K.-H., J.-H. Ree, Y. Kim, S. Kim, S.-Y. Kang, y W. Seo. “Assessing Whether the 2017 Mw 5.4 Pohang Earthquake in South Korea Was an Induced Event.” *Science* 360 (2018): 1007–1009.
- Knight, Alan. “The Politics of Expropriation.” En *The Mexican Petroleum Industry in the Twentieth Century*, editado por Jonathan C. Brown y Alan Knight, Austin: University of Texas Press, 1986.
- Leonard-Barton, Dorothy. “Core Capabilities and Core Rigidities: A Paradox in Managing New Product Development.” *Strategic Management Journal* 13, no. 1 (1992): 111–125.
- Leydesdorff, Loet, y Peter Van den Besselaar. “Competing Technologies: Lock-ins and Lock-outs.” *AIP Conference Proceedings* 437, no. 1 (1998): 309–323.
- Líndal, B. “Industrial and Other Applications of Geothermal Energy (Except Power Production and District Heating).” En *Geothermal Energy: Review of Research and Development*, editado por Christopher H. Armstead, 135–148. UNESCO, 1973.
- Llamosa Ardila, Oscar. “México otorga concesión geotérmica para el área de Celaya, Guanajuato.” *PiensaGeotermia*, 2 de septiembre de 2025. <https://www.piensageotermia.com/mexico-otorga-concesion-geotermica-para-el-area-de-celaya-guanajuato/>
- Mahoney, James, Khairunnisa Mohamedali y Christoph Nguyen. “Causality and Time in Historical Institutionalism.” En *The Oxford Handbook of Historical Institutionalism*, editado por Orfeo Fioretos, Tulia G. Falletti y Adam Sheingate,

- 71–88. Oxford: Oxford University Press, 2016; edición en línea, Oxford Academic, 2 de mayo de 2016.
- Manzella, A., et al. “Environmental and Social Aspects of Geothermal Energy in Italy.” *Geothermics* 72 (2018): 232–248.
- Melgar Palacios, María de Lourdes. “La revolución energética que México requiere.” *Revista Digital Universitaria* 13, no. 10 (1 de octubre de 2012): 2–10.
- Muraoka, Hirofumi. “Geothermal Energy.” En *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*, editado por Wei-Yin Chen, Maximilian Lackner y Toshio Suzuki. Nagoya: Springer, 2017.
- Negro, Simona O., Floortje Alkemade y Marko P. Hekkert. “Why Does Renewable Energy Diffuse So Slowly? A Review of Innovation System Problems.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, no. 6 (1 de agosto de 2012): 3836–3846.
- North, Douglass C. *Institutions, Institutional Change and Economic Performance*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- North, Douglass C. *Structure and Change in Economic History*. New York: Norton, 1981.
- Ochoa Reza, Enrique. *Para entender la reforma al sector eléctrico*. México: Producciones Sin Sentido Común, 2015.
- Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. “Enhanced Geothermal Systems.” *U.S. Department of Energy*. Consultado el 2 de julio de 2024. <https://www.energy.gov/eere/geothermal/enhanced-geothermal-systems>.

Ordóñez, Tanya. *Introducción a la geotermia*. Tegucigalpa: Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Departamento de Física de la Tierra, Carrera de Geología, s. f. PDF.

Oso Trava. *Disciplina FAMILIAR y Energía Renovable | NINFA SALINAS #285*. Video de YouTube. Publicado el 24 de junio de 2024. <https://www.youtube.com/watch?v=F5cgfS4u5Ro>.

Our World in Data. “Installed Geothermal Capacity.” *Our World in Data*. Consultado el 30 de enero de 2025. <https://ourworldindata.org/grapher/installed-geothermal-capacity?tab=chart&country=~MEX>.

———. “Mexico.” Consultado el 21 de abril de 2024. <https://ourworldindata.org/energy/country/mexico>.

———. *Oil Rents as a Share of GDP*. Consultado el 19 de septiembre de 2025. <https://ourworldindata.org/grapher/oil-rents-as-a-share-of-gdp?tab=line&country=~MEX>

Palomo-Torrejón, Elisabet, Antonio Colmenar-Santos, Enrique Rosales-Asensio, y Francisco Mur-Pérez. “Economic and Environmental Benefits of Geothermal Energy in Industrial Processes.” *Renewable Energy* 174 (2021): 134–146.

Pemex. Pemex: Plan Estratégico 2025-2030. Vídeo, 5 de agosto de 2025. Canal Pemex. YouTube. <https://youtu.be/czxoYyfvRxQ>.

Piensa Geotermia. “Desarrollo de la energía geotérmica en Turquía: Informe científico de la UNESCO, Füsün Servin Tut Haklidir.” Consultado el 18 de

agosto de 2025.

<https://www.piensageotermia.com/desarrollo-de-la-energia-geotermica-en-turquia-informe-cientifico-de-la-unesco-fusun-servin-tut-haklidir/>.

Prol-Ledesma, Rosa María. *El calor de la Tierra*. 3a ed. México: FCE, SEP, Conacyt, 2002.

Ramírez, Michelle. *Blog de Energía del BID*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Accedido el 25 de febrero de 2025. <https://blogs.iadb.org/energia/es/author/michellera/>.

———. *How Do Country-Specific Policy and Regulatory Differences Impact Geothermal Development?* Master's thesis, Berlin School of Economics and Law, September 2024.

REN21. *Renewables 2022 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat, 2022.

Reséndiz-Núñez, Daniel. “Aspectos ambientales de la evaluación y manejo de proyectos eléctricos.” En *El sector eléctrico de México*, editado por Daniel Reséndiz, 150–162. *Estructura Económica y Social de México Los Noventa*. México: Fondo de Cultura Económica, 1994.

Reséndiz, Daniel, ed. *El sector eléctrico de México. Estructura Económica y Social de México Los Noventa*. México: Fondo de Cultura Económica, 1994.

Rodríguez y Rodríguez, Guillermo. “Evolución de la industria eléctrica en México.” En *El sector eléctrico de México*, editado por Daniel Reséndiz. *Estructura Económica y Social de México Los Noventa*. México: Fondo de Cultura Económica, 1994.

- Romo Jones, José, y Laura Vélez Andrade. *CeMIEGeo: Contribución a la sociedad y al conocimiento*. Ensenada: CICESE, 2023.
- Ross, Jennifer, y Barry M. Staw. “Organizational Escalation and Exit: Lessons from the Shoreham Nuclear Power Plant.” *Academy of Management Journal* 36, no. 4 (1993): 701–732.
- Rousseau, Isabelle. “El sector energético de AMLO: soberanía nacional y modelo de desarrollo endógeno (2018–2024).” *Foro Internacional* 65, no. 3 (2025): 675–727. Ciudad de México: El Colegio de México.
- . “Introducción.” En *La política energética y petrolera vista desde “Foro Internacional”*, editado por Isabelle Rousseau, 11–20. Ciudad de México: El Colegio de México, Centro de Estudios Internacionales, 2017.
- . “La renovación institucional en el sector hidrocarburos y el desarrollo industrial: un balance de la Reforma Energética 2013–2014.” En *Reforma Energética y Desarrollo Industrial*, coordinado por Arturo Oropeza García, 49–66. México D.F.: UNAM, 2015.
- . *Tribulaciones de Dos Empresas Petroleras Estatales, 1900-2014: (Trayectorias Comparadas de Pemex y PdVSA)*. Colegio de México, 2017.
- Sanyal, S. K., A. Robertson-Tait, M. S. Jayawardena, G. Hutterer, y L. Berman. “Comparative Analysis of Approaches to Geothermal Resource Risk Mitigation: A Global Survey.” *Knowledge Series* 24 (2016).
- Schot, Johan, Boelie Elzen, y Remco Hoogma. “Strategies for Shifting Technological Systems: The Case of the Automobile System.” *Futures* 26, no. 10 (1994).

Secretaría de Energía (SENER). *Balance Nacional de Energía 2023*. Ciudad de México: Secretaría de Energía, 2024. PDF.

———. *Balance Nacional de Energía 2023*. Gobierno de México, 6 de febrero de 2025. Acceso 20 de mayo de 2025. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/977268/Balance_Nacional_de_Energ_a_2023.FINAL06.02.2025.1.pdf.

———. “Balance Nacional de Energía.” *Gobierno de México*. Consultado el 10 de julio de 2025. <https://www.gob.mx/sener/es/articulos/balance-nacional-de-energia-296106>

———. “Explicación ampliada de la Reforma Energética.” Gobierno de México, 2013. Acceso el 11 de febrero de 2025. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/10233/Explicacion_ampliada_de_la_Reforma_Energetica1.pdf.

———. *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2022–2036: Capítulo 3*. 2022. Acceso 20 de mayo de 2025. <https://base.energia.gob.mx/prodesen22/Capitulo3.pdf>

———. *Programa Sectorial de Energía 2020–2024*. Ciudad de México: Gobierno de México, 2020. PDF. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/562631/PS_SENER_CACEC-DOF_08-07-2020.pdf.

Servicio Geológico Mexicano. “Evolución de la tectónica en México.” Museo Virtual de Riesgos Geológicos. Publicada el 22 de marzo de 2017. Consultado el 27 de julio de 2024.

<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Evolucion-tectonica-Mexico.html>.

Seto, Karen C., Steven J. Davis, Ronald B. Mitchell, Eleanor C. Stokes, Gregory Unruh, y Diana Ürge-Vorsatz. “Carbon Lock-In: Types, Causes, and Policy Implications.” *Annual Review of Environment and Resources* 41 (2016): 425–452.

Skocpol, Theda. “Why I Am an Historical Institutionalism.” *Polity* 28, no. 1 (otoño de 1995): 103–106. Publicado por The University of Chicago Press en nombre de la Northeastern Political Science Association.

Skocpol, Theda, y Paul Pierson. “Historical Institutionalism in Contemporary Political Science.” En *Political Science: State of the Discipline*, editado por Ira Katznelson y Helen V. Milner, 693–721. Nueva York: W. W. Norton, 2002.

Soltani, M., Farshad Moradi Kashkooli, Mohammad Souri, Behnam Rafiei, Mohammad Jabarifar, Kobra Gharali, y Jatin S. Nathwani. “Environmental, Economic, and Social Impacts of Geothermal Energy Systems.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140 (2021): 110750.

Statista. “Largest Geothermal Complexes Worldwide as of 2023, by Size.” Consultado el 18 de noviembre de 2024. <https://www.statista.com/statistics/525206/geothermal-complexes-worldwide-by-size/>

Staw, Barry M. “Knee-deep in the Big Muddy: A Study of Escalating Commitment to a Chosen Course of Action.” *Organizational Behavior and Human Performance* 16, no. 1 (June 1, 1976): 27–44.

Sydow, Jörg, Georg Schreyögg, y Jochen Koch. “Organizational Path Dependence: Opening the Black Box.” *Academy of Management Review* 34, no. 4 (2009): 689–709.

Szanyi, János, Ladislaus Rybach, y Hawkar A. Abdulhaq. “Geothermal Energy and Its Potential for Critical Metal Extraction—A Review.” *Energies* 16 (2023): 7168. <https://doi.org/10.3390/en16207168>.

Thaler, Richard H., y Cass R. Sunstein. *Nudge: Improving Decisions about Health, Wealth, and Happiness*. New Haven, CT: Yale University Press, 2008.

The New York Times. “México teme que EU cierre el grifo del gas natural: dependencia y riesgos.” Edición en español, 16 de abril de 2025. <https://www.nytimes.com/es/2025/04/16/espanol/america-latina/mexico-gas-natural-dependencia-eeuu.html>.

Top 10 países con mayor capacidad de generación de energía geotérmica instalada en 2023. Plataforma Española Tecnológica y de Innovación en Geotermia (GEOPLAT), 9 de enero de 2024. <https://blog.geoplat.org/2024/01/09/top-10-paises-con-mayor-capacidad-de-generacion-de-energia-geotermica-instalada/>

Torres Rodríguez, Vicente, coord. *Geotermia en México*. Programa Universitario de Energía, Coordinación de la Investigación Científica, Universidad Nacional Autónoma de México, 1993.

United Nations. *Yearbook of the United Nations 1987*. Chapter 13. Consultado el 11 de octubre de 2024. https://cdn.un.org/unyearbook/yun/chapter_pdf/1987YUN/1987_P2_CH13.pdf.

University College London. “The Earth's Interior.” *UCL Seismin Explore*. Acceso 17 de julio de 2025. <https://www.ucl.ac.uk/seismin/explore/Earth.html>.

Unruh, Gregory C. “Escaping Carbon Lock-In.” *Energy Policy* 30, no. 4 (2002): 317–325.

———. “Understanding Carbon Lock-In.” *Energy Policy* 28, no. 12 (2000): 817–830.

U.S. Department of Energy (DOE) y Comisión Federal de Electricidad (CFE). *Agreement Between the Department of Energy of the United States of America and the Comisión Federal de Electricidad of the Mexican United States in the Field of Geothermal Energy*. 1986.

U.S. Department of Energy (DOE). *GeoVision: Harnessing the Heat Beneath Our Feet*. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2019.

Walker, William. “Entrapment in Large Technology Systems: Institutional Commitment and Power Relations.” *Research Policy* 29, núms. 7–8 (2000): 833–846.

Lista de entrevistas

Las entrevistas tuvieron lugar entre agosto de 2024 y febrero de 2025. Con algunas personas hubo oportunidad de tener más de una. En conjunto, se entrevistaron personas ex funcionarias de altos mandos o cargos directivos de la CFE, SENER, del INEEL, del BID, de instituciones educativas como la UNAM y de diversas consultoras y empresas privadas. Algunos tienen carreras en varias de estas instituciones. A continuación se comparten las fechas de realización. Para mantener la privacidad de los entrevistados, el orden de las entrevistas no corresponde necesariamente con las instituciones mencionadas.

Entrevistas realizadas	
<i>Código</i>	<i>Fecha</i>
A	19 de agosto de 2024
B	12 de septiembre de 2024
C	18 de septiembre de 2024
D	19 de septiembre de 2024
E	25 de septiembre de 2024
F	27 de septiembre de 2024
G	1 de octubre de 2024
H	12 de noviembre de 2024
I	29 de noviembre de 2024
J	6 de enero de 2025
K	9 de enero de 2025
L	10 de enero de 2025
M	11 de febrero de 2025

Ejemplos de preguntas de entrevistas

- ¿Cuál es su trayectoria en relación con la geotermia?
- ¿Por qué se frenó el desarrollo geotérmico a finales del siglo XX?
- ¿Qué lugar tenían los usos directos en CFE?
- ¿La LEG era necesaria para impulsar el fomento de la geotermia en México?
- Antes de la LEG y/o la Reforma Energética de 2013, ¿existían las condiciones adecuadas para un mayor desarrollo geotérmico en México (aunque fuera predominantemente de CFE)?
- ¿Qué omite la LEG que sería deseable para el desarrollo de la geotermia?
- Además de la descarbonización del sector energético, ¿qué otros objetivos de política energética podría satisfacer la geotermia?
- ¿Qué oportunidades piensa que tiene a futuro la geotermia?

Abreviaciones

AGM: Asociación Geotérmica Mexicana
AGE: Aprovechamiento Geotérmico Exento
AGS: *Advanced Geothermal Systems*
BID: Banco Interamericano de Desarrollo
CFE: Comisión Federal de Electricidad
CeMIEGeo: Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica
CMNUCC: Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CNE: Comisión Nacional de Energía
CRE: Comisión Reguladora de Energía
CTI: Complejo técnico-institucional
DOE: *Department of Energy*
EEUU: Estados Unidos
EGS: *Enhanced Geothermal Systems*
EIA: Evaluación de Impacto Ambiental
GEI: Gases de efecto invernadero
GHP: *Geothermal Heat Pumps*
GW: Gigavatio
GWt: Gigavatios térmicos
IEA: *International Energy Agency*
INEEL: Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias
IPN: Instituto Politécnico Nacional
IRENA: *International Renewable Energy Agency*
LCOE: *Levelized Cost of Electricity*
LGCC: Ley General de Cambio Climático
LEG: Ley de Energía Geotérmica
LG: Ley de Geotermia
mdd: Millones de dólares
ML: Magnitud de locación
MW: Megavatio
OPEP: Organización de Países Exportadores de Petróleo
SENER: Secretaría de Energía
UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México