



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Características técnicas y de regulación de pozos abandonados y con potencial geotérmico en campos de hidrocarburos para aplicaciones geotérmicas. Comparación de México con otras partes del Mundo.

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Petrolero

P R E S E N T A

Roberto David Lozano Guarneros

DIRECTOR(A) DE TESIS

Dr. Héctor Miguel Aviña Jiménez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



AGRADECIMIENTOS

A mi mamá por toda la dedicación y esfuerzo que has puesto en sacarnos adelante, por tus consejos que siempre me guiaron para seguir el camino correcto, por tu cariño que siempre estuvo presente y por ser quién eres y como eres, la mejor madre.

A mi hermana que sin ti no sería quien soy ni lograría lo que he logrado porque siempre estás para mí y eres parte esencial de mi vida te dedico este logro y espero con ansias apoyarte y verte lograr los tuyos.

A mi novia Jazmín porque siempre has estado en este camino conoces todo lo que viví durante este trayecto y agradezco a ver estado contigo durante esta parte de mi vida, por apoyarme siempre que estaba vencido, por brindarme tu amor y ser mi mejor amiga y novia durante todos estos años.

Para mis tíos Alejandro y Laura saben que son mis segundos padres y siempre me apoyaron en todos los aspectos para poder alcanzar mis logros, porque sin ser su deber supieron brindarme consejos, soporte y lo más importante cariño.

Al resto de mi familia, abuelos, tíos y primos porque cada uno me ha enseñado algo valioso, por los momentos felices y el apoyo que han sabido brindarme.

Por supuesto a mis amigos de la prepa, de la universidad y los mancos elite porque hicieron de esta etapa la mejor parte de mi vida hasta ahora y porque cada uno de ustedes ha dejado una huella en este camino.

Para mi papá te fuiste pronto pero siempre estás conmigo y siempre pienso y en la falta que nos has hecho, te dedico este logro y los que están por venir.

A mi querida universidad ya que formar parte de ella ha sido la mejor experiencia de la vida.

¡Por mi raza hablará el espíritu!

“Esta tesis utilizó información petrolera proporcionada por la Comisión Nacional de Hidrocarburos, de acuerdo con el anexo C de la licencia de uso de la información a favor de la UNAM, de fecha 11 de diciembre de 2017, bajo la nomenclatura CNIH-C-00417. Dicha información es propiedad de la Nación y su acopio, resguardo, uso administración y actualización, así como de publicación de la misma corresponde a la Comisión Nacional de Hidrocarburos.”



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE FIGURAS	6
ÍNDICE TABLAS.....	8
OBJETIVOS	9
Objetivo General	9
Objetivos Particulares	9
Planteamiento del Problema.....	9
INTRODUCCIÓN	10
1. MARCO TEÓRICO.....	11
1.1 ¿Qué es la Geotermia?.....	11
1.1.2 Sistemas Geotérmicos	11
.....	12
1.1.3 ¿Cómo se clasifica la geotermia?	12
1.1.4 Transferencia de calor	14
1.1.5 Propiedades térmicas de las rocas	15
1.2 Aplicaciones de la geotermia	16
.....	18
1.2.1 Generación Eléctrica	18
1.2.2 Usos Directos	21
2. SITUACIÓN PETROLERA ACTUAL EN MÉXICO	26
2.1 Historia de la regulación petrolera.	26
2.2 Regulación actual	27
2.3 Estudio de los pozos petroleros y sus condiciones actuales en México	30
2.3.1 Provincias petroleras	30
2.3.2 Pozos de hidrocarburos en México.	31



2.3.3	Condición de los pozos actualmente.....	32
	33
	33
2.3.4	Clasificación de pozos por su condición actual.....	33
2.3.5	Regulación y control de pozos en México.....	35
2.3.6	Pozos abandonados en asignaciones y contratos de Pemex.....	37
2.3.7	Pozos abandonados en áreas contractuales de E&P privadas.....	38
3	PROYECTOS GEOTÉRMICOS CON POZOS ABANDONADOS.....	39
3.1	Pozos abandonados de hidrocarburos para extraer calor.....	39
3.2	Revisión de ejemplos a nivel mundial.....	42
3.2.1	Principales factores que intervienen en el proceso de recuperación del calor geotérmico y sus usos.....	46
3.2.2	Gradiente geotérmico.....	46
3.2.3	Tipo de fluido de trabajo.....	46
3.2.4	Temperatura del fluido inyectado y ritmo de inyección.....	47
	47
3.2.5	Influencia del aislamiento.....	47
3.3	Características técnicas de los proyectos.....	48
	53
3.4	Características legales del país donde se desarrolla.....	54
3.4.1	Estados Unidos de América.....	54
3.4.2	Canadá.....	56
3.4.3	Italia.....	57
3.4.4	Francia.....	59
3.4.5	Comparación legal.....	60
4	ANÁLISIS DE LOS POZOS CON POTENCIAL GEOTÉRMICO EN MÉXICO, CASO DE ESTUDIO.....	63
4.1	Potencial Geotérmico en México.....	63



Índice

4.1.1. Provincias geotérmicas en México.....	63
4.2 Pozos petroleros con potencial geotérmico.....	65
4.3 Campos de estudio	69
.....	70
4.3.1 Arcos	70
.....	71
4.3.2 Comititas	71
4.3.3 Velero.....	72
.....	72
4.4 Pozos prospecto.....	73
4.4.1 Comparación casos de estudio	77
5 Conclusiones.	79
6. REFERENCIAS.....	80



ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1. Representación gráfica de un sistema geotérmico hidrotermal. (Dickson y Fanelli, 2003).....	12
Figura 1.2. Clasificación de fuentes geotérmicas Temperatura/entalpia.....	13
Figura 1.3. Tipos de recursos geotérmicos. “¿Qué es la geotermia?”, Consultado el 25/05/21, http://www.cemiegeo.org/index.php/que-es-la-geotermia	14
Figura 1.4. Propiedades térmicas de los materiales comunes.	15
Figura 1.5. Ejemplo básico de un sistema abierto y un sistema cerrado utilizados para la climatización de casas. (Friedman, 2009)	17
Figura 1.6. Diagrama de Lindal. (Australian Academy of Science, 2018)	18
Figura 1.7. Intercambiador de calor de Evaporación Instantánea. (IIDEA, consultado 2021)	20
Figura 1.8. Comparación del uso directo mundial de energía geotérmica en TJ / año desde 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 y 2020. (Toth, 2020).....	21
Figura 1.9. Instalaciones típicas de bombas de calor geotérmica. (CanGEA, 2014)	22
Figura 1.10. Sistema de intercambiador de calor de fondo en la escuela secundaria Ponderosa, Klamath Falls, Oregon.....	23
Figura 1.11. Bañera geotérmica en Blue Lagon, Islandia. (Piensa en Geotermia).....	25
Figura 2.1. Modelo regulatorio en México antes de la Reforma Energética fuente adaptada de la Comisión Reguladora de Energía (CRE).....	27
Figura 2.2. Modelo regulatorio en México, fuente adaptada de la Comisión Reguladora de Energía (CRE)	29
Figura 2.2. Provincias petroleras en México. Pemex 2013	30
Figura 2.3. Pozos perforados en México de 2009 a 2019 por operador, Statista 2021, https://es.statista.com/estadisticas/1135387/pozos-petroleros-perforados-por-operador-mexico/	31
Figura 2.4. Pozos perforados en México de enero 2019 a marzo 2021, CNH 2021, https://sih.hidrocarburos.gob.mx/	32
Figura 2.5. Distribución de pozos en México, CNH 2021, https://sih.hidrocarburos.gob.mx/	33



Figura 2.6. Estado de los pozos por zona. CNH, 2021. https://mapa.hidrocarburos.gob.mx/	35
Figura 3.1. Presión de sobrecarga (Cruz, 2014).	41
Figura 3.2. Esquema sobre la generación de poder a partir de un pozo petrolero abandonado. (Yong-Le Nian, 2018).....	41
Figura 3.3. Esquema de una posible planta de generación eléctrica híbrida. (Sanyal & Butler, 2010).....	44
Figura 3.5. Flujo de calor vs flujo másico. (C. Alimonti, 2016)	47
Figura 3.4. Temperatura en cabeza del pozo vs flujo másico (C. Alimonti, 2016).....	47
Figura 3.6. Características para el desarrollo geotérmico en AOGW. Elaboración propia..	53
Figura 4.1. Mapa de las provincias geotérmicas en México con la distribución de flujo de calor en fondo. (Rosa María Prol-Ledesmaa, 2019).....	64
Figura 4.2. distribución de pozos por profundidades en la cuenca de Burgos. CNH 2022. https://mapa.hidrocarburos.gob.mx/	65
Figura 4.3. Datos de flujo de calor en territorio mexicano y en Burgos. (Prol-Ledesma, 2020).....	66
Figura 4.4. Comparación de temperaturas de fondo de pozos supuestas en la zona de Burgos con los rangos en los usos geotérmicos de acuerdo con el diagrama de Lindal.	68
Figura 4.5. Campos seleccionados para el caso de estudio.	69
Figura 4.6. Campo Arcos.....	71
Figura 4.7. Campo Comitas.....	71
Figura 4.8. Campo Velero.	72
Figura 4.9. Usos aplicables en los pozos estudiados.	76
Figura 4.10. Comparación de profundidades y temperaturas entre proyectos de AOGW alrededor del mundo y los campos de estudio en México. Elaboración propia	78



ÍNDICE TABLAS

Tabla 2.1. Estado de los pozos por zona. CNH, 2021. https://mapa.hidrocarburos.gob.mx/	34
Tabla 2.2. Estado de los pozos en asignaciones por zona. CNH, 2021. https://mapa.hidrocarburos.gob.mx/	37
Tabla 2.3. Modalidad del contrato para cada estado actual de los pozos. CNH, 2021. https://mapa.hidrocarburos.gob.mx/	38
Tabla 3.1. Resumen de campos de petróleo y gas con potencial de recuperación térmica. X. Liu et al. / Energy 142 (2018).....	50
Tabla 3.2. Parámetros asumidos. (Claudio Alimonti E. S., 2021)	50
Tabla 3.3. Evaluación del potencial geotérmico. (Claudio Alimonti E. S., 2021).....	51
Tabla 3.4. Datos de Profundidad, temperatura y gradiente de distintos proyectos de AOGW alrededor del mundo.	52
Tabla 3.5. Comparación en materia de regulación de recursos energéticos y desarrollo geotérmico. Elaboración propia.....	62
Tabla 4.1 Datos de interés en pozos no productores de los campos de estudio.	70
Tabla 4.2 Datos de interés en pozos no productores de los campos de estudio.	73



OBJETIVOS

Objetivo General

Describir las principales características técnicas y regulatorias que permiten el desarrollo de proyectos geotérmicos empleando pozos petroleros abandonados o con potencial geotérmico en yacimientos de hidrocarburos alrededor del mundo en comparación con México.

Objetivos Particulares

- Estudio de las principales características técnicas usadas a nivel mundial.
- Comparar y analizar la situación técnica y regulatoria en México
- Principales áreas de oportunidad en territorio nacional para la aplicación geotérmica.
- Propuesta de áreas de oportunidad nacional para la aplicación geotérmica

Planteamiento del Problema

La industria geotérmica está obstaculizada por la rentabilidad económica de los proyectos, no obstante, el reuso de pozos petroleros inactivos o abandonados seleccionados a través de la determinación de sus características, físicas, técnicas y regionales, impulsará el desarrollo en la industria geotérmica de media y baja entalpia en territorio mexicano, permitiendo así incentivar la aplicación de usos directos o incluso de generación eléctrica.

Como se sabe una de las principales causas del cierre de pozos en territorio mexicano es el alto corte de agua que estos presentan después de los procesos de recuperación secundaria (inyección de agua como uno de los procesos más comunes para mantener la presión del yacimiento), sin embargo es posible adaptar los pozos ya abandonados por dicha causa e incluso hacer uso de aquellos pozos que por sus condiciones actuales figuran como prospectos para el aprovechamiento del calor presente en la zona, el área de oportunidad del uso de la energía en forma de calor en estos pozos puede aplicarse tanto a los usos geotérmicos como a la extracción del aceite remanente en los yacimientos maduros con pozos abandonados.

Así mismo por medio del presente se busca impulsar el interés en el aprovechamiento de los pozos de hidrocarburos abandonados y que sea un medio que facilite la ubicación de pozos idóneos para dichos procesos, así como para investigaciones pertinentes que proporcionan las bases para llevar a cabo proyectos de aplicación.





INTRODUCCIÓN

Por muchos años la industria petrolera ha sido parte importante en el progreso energético de México, los años de explotación de recursos fósiles han dejado una huella de más de 32,000 pozos petroleros a lo largo del territorio nacional, sin embargo; es hora de mirar hacia las fuentes renovables, y en otras partes del mundo ya se han establecido acuerdos para incentivar el desarrollo de estos recursos. Hablando del uso de pozos petroleros abandonados (AOWG) se han realizado numerosos proyectos en distintas los cuales demuestran la factibilidad y rentabilidad que dicho uso genera en la industria geotérmica, no obstante, a pesar de que México cuenta tanto con recursos geotérmicos como con pozos petroleros con potencial calorífico, no ha realizado ningún proyecto de este tipo.

En el presente trabajo se buscará definir las características principales para clasificar los AOGW como pozos potenciales para aplicaciones geotérmicas enfocándose mayormente a los usos directos los cuales pueden ser aplicados en un rango de temperaturas más amplio.

En el primer capítulo se definen conceptos básicos con el fin de demostrar la similitud que ciertos yacimientos geotérmicos tienen con los yacimientos de hidrocarburos, al mismo tiempo se indagará brevemente en los usos geotérmicos directos e indirectos, su presencia a nivel mundial y como se aplican.

En el segundo capítulo se habla sobre la situación petrolera actual en México, el estado de los pozos, si están en operación, bajo que modalidad de producción se encuentran y la cantidad de pozos en cada provincia petrolera, más adelante se habla sobre la regulación energética en México y sus cambios más importantes.

El tercer capítulo es el apartado que retoma información de distintos proyectos en pozos petroleros para uso geotérmico, los principales aspectos a considerar y las características de los yacimientos o pozos utilizados para dichos procesos, el capítulo termina describiendo la regulación energética de los principales países que han realizado estos proyectos para poder hacer una comparación con el marco legal mexicano.

El capítulo final describe las principales áreas de oportunidad que México tiene para el uso de AOGW haciendo uso de datos reales de temperatura y profundidad para comparar el potencial geotérmico de los campos de estudio en México con los proyectos abordados en el tercer capítulo.





1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se mencionarán conceptos geotérmicos básicos como son, los tipos de yacimientos geotérmicos y su clasificación, transferencia de calor y las propiedades térmicas de las rocas con el fin de discernir una similitud entre los yacimientos geotérmicos convencionales y los yacimientos de hidrocarburos. Posteriormente se habla sobre las principales aplicaciones de las fuentes geotérmicas, usos directos y generación eléctrica, así como sus principales características y su desarrollo a nivel mundial.

1.1 ¿Qué es la Geotermia?

La geotermia por definición etimológica deriva del griego, donde “*geos*” significa tierra y “*thermos*” significa calor, lo cual se puede interpretar como “calor de la tierra”.

De esta forma la energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor en las rocas existentes en la corteza terrestre y que puede ser aprovechada por el hombre en términos energético-económicos. El calor al igual que otras fuentes energéticas como el petróleo o el carbón, se encuentra ampliamente distribuido, si bien el calor geotérmico está relacionado a las manifestaciones de magma o cuerpos magmáticos también es posible encontrarlo en otros tipos de zonas no forzosamente volcánicas. El agua y el vapor son las principales fuentes de transferencia de esta expresión de energía y son parte importante en el aprovechamiento de ésta.

1.1.2 Sistemas Geotérmicos

Los sistemas geotérmicos se encuentran en zonas donde se presentan gradientes de temperatura anormales, es decir que se encuentren por encima del valor promedio mundial, $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. “Un sistema geotérmico hidrotermal está compuesto por tres elementos principales; una fuente de calor, un yacimiento y un fluido.” (Fanelli, 2003) En este caso la fuente de calor se refiere a una intrusión magmática poco profunda, el yacimiento es un conjunto de rocas permeables que permiten el flujo del fluido geotérmico, agua en la mayoría de los casos, ya sea en estado líquido o gaseoso dependiendo de la temperatura a la cual se encuentra el yacimiento. Figura 1.1



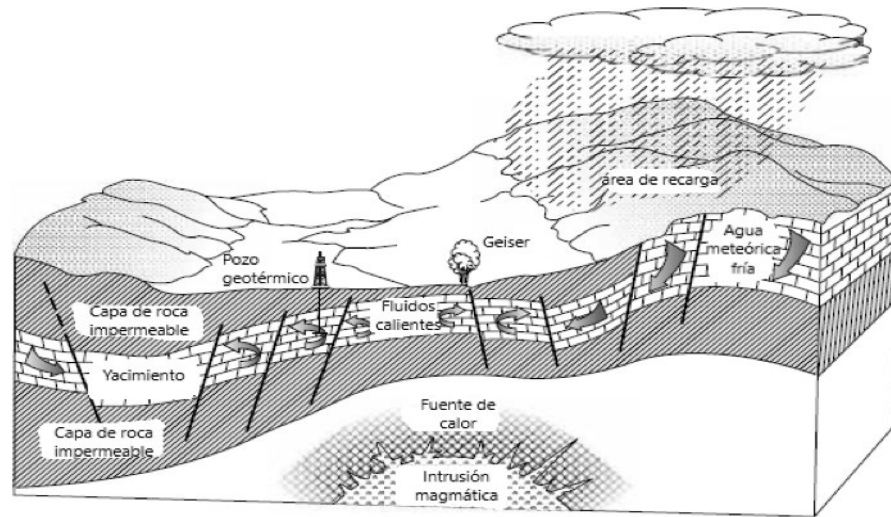


Figura 1.1. Representación gráfica de un sistema geotérmico hidrotermal. (Dickson y Fanelli, 2003).

1.1.3 ¿Cómo se clasifica la geotermia?

Existen diferentes tipos de yacimientos geotérmicos su clasificación se basa en las temperaturas y como pueden ser aprovechados, de acuerdo con el Centro Mexicano de innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo), los recursos geotérmicos pueden dividirse en; recursos de temperatura alta ($>180^{\circ}\text{C}$), media ($100^{\circ} - 180^{\circ}\text{C}$) y baja ($<100^{\circ}\text{C}$). (“¿Qué es la geotermia?”, CeMIEGeo, s.f.)

El calor natural del centro de la tierra fluye hacia arriba debido a la gran diferencia de temperaturas entre la superficie y el interior de la corteza. Las fuentes que generan esta energía en forma de calor en el centro de la tierra son:

- Decaimiento de elementos radiactivos.
- Procesos físicos y químicos dentro de la corteza terrestre.
- Procesos tectónicos que causan el movimiento de las placas terrestres.

A lo largo de la superficie el calor presente es debido a la energía del sol, dicha temperatura varía debido a los cambios estacionarios, pero se sabe que a cierta profundidad existe una línea



neutral donde la temperatura se mantiene constante a lo largo del año, la profundidad de este punto neutral depende de la región geográfica, así como de las propiedades térmicas de las rocas. La temperatura y la entalpía por sí solas no pueden definir adecuadamente el estado de los fluidos geotérmicos. A pesar de ese hecho, los recursos geotérmicos se clasifican como campos de alta entalpía (la temperatura es $>150\text{ }^{\circ}\text{C}$), campos de entalpía media (la temperatura es de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$) y campos de baja entalpía (la temperatura es $<90\text{ }^{\circ}\text{C}$) según sus temperaturas del fluido del yacimiento Figura 1.2. (White and Williams, 1975; Muffler, 1979; Williams et al., 2008b)

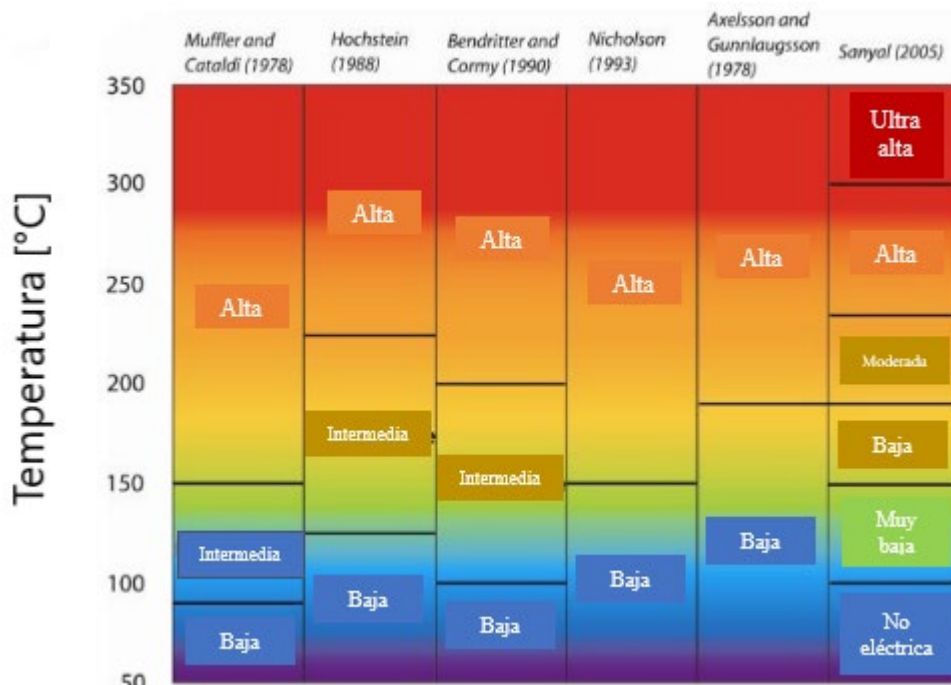


Figura 1.2. Clasificación de fuentes geotérmicas Temperatura/entalpía.

Otro tipo de clasificación más detallada de los sistemas geotérmicos de acuerdo con la CeMIEGeo (Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica) se muestra en la Figura 1.3; donde los sistemas hidrotermales corresponden a aquellos en los cuales predomina el vapor o líquido dando así una transferencia convectiva del calor. Los sistemas conductivos involucran las rocas o cuerpos magmáticos que se encuentran en el subsuelo y que representan la fuente de calor a aprovechar en la explotación del sistema.





Por último, y de mayor importancia en este caso de estudio se encuentran los sistemas de acuíferos profundos o también conocidos como sistemas geo-presurizados, son aquellos que contienen fluidos circulando en un medio poroso y permeable a profundidades mayores a los 3 km de profundidad y que a pesar de carecer de una fuente de calor presentan importantes gradientes geotérmicos. (Fanelli, 2003)

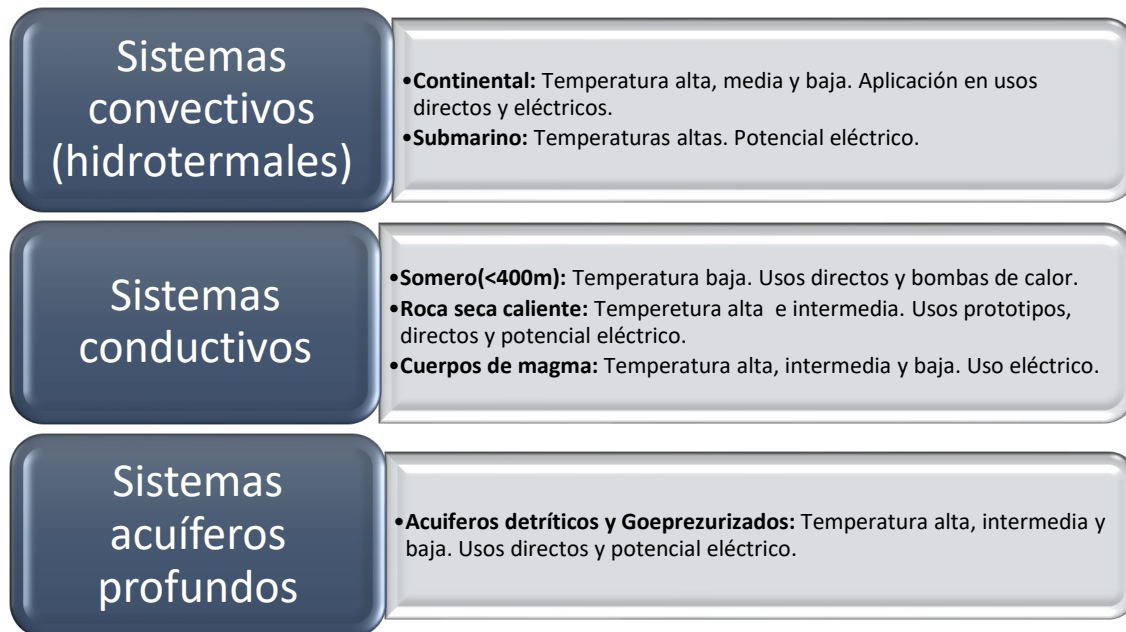


Figura 1.3. Tipos de recursos geotérmicos. "¿Qué es la geotermia?", Consultado el 25/05/21, <http://www.cemiegeo.org/index.php/que-es-la-geotermia>.

1.1.4 Transferencia de calor

La transferencia de calor se da gracias a las diferencias de temperatura que existen entre dos sistemas, dicha transferencia puede ocurrir a través de fenómenos como la conducción, convección y radiación. La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes, menos energéticas, como resultado de la interacción entre ellas. La convección es el modo de transferencia de calor entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento, y comprende los efectos combinados de la conducción y del movimiento del fluido. La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas.





1.1.5 Propiedades térmicas de las rocas

La capacidad calorífica, la conductividad térmica, la difusividad térmica y el coeficiente de expansión son las principales propiedades térmicas de interés para el estudio de la transferencia de calor.

Capacidad Calorífica: Se define como la cantidad de energía térmica en forma de calor necesaria para elevar la temperatura 1 °K de un 1 m³ de material.

Conductividad térmica: Es la capacidad de las rocas para transferir energía a otro sistema, esto a través del flujo de calor que se da debido a la diferencia de temperaturas entre dos sistemas. La conductividad térmica relaciona los gradientes de temperatura con el flujo de calor. Figura 1.4

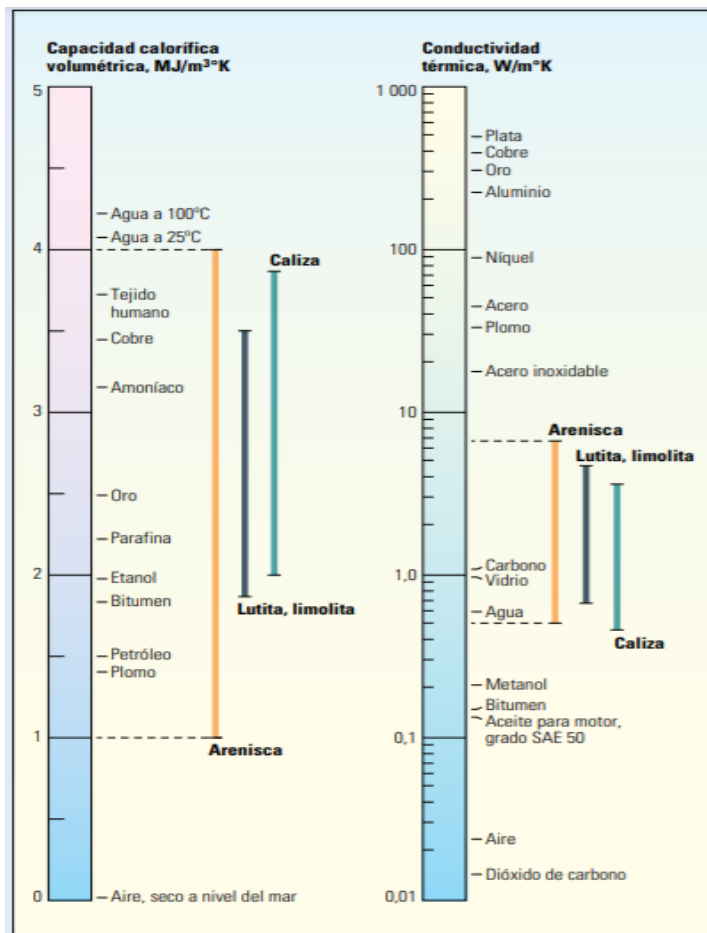


Figura 1.4. Propiedades térmicas de los materiales comunes.





1.2 Aplicaciones de la geotermia

De forma puntual existen dos procesos o sistemas por los cuales se puede explotar la energía geotérmica; a través de un sistema abierto o un sistema cerrado.

Un sistema cerrado consiste en el uso de un fluido de trabajo que se circula de forma constante a través de tuberías subterráneas permitiendo así que exista una transferencia de calor hacia el fluido circulante el cual transportara dicha energía calorífica a las turbinas. Los sistemas de energía geotérmica de circuito cerrado (CLG, Closed-Loop Geothermal) dejan a un lado aspectos como la permeabilidad y los problemas de flujo en el medio poroso haciendo circular el fluido a través de pozos y tuberías sellados, en un intercambiador de calor de fondo de pozo (DHX) o tuberías selladas que reciclan un fluido de trabajo. Las tecnologías CLG transfieren el calor del subsuelo a un fluido de transporte térmico que circula continuamente dentro del pozo sellado. (Andrew Van Horn, 2020)

En un sistema abierto se utiliza el agua subterránea para transportar el calor hacia la superficie donde será aprovechado a través de los intercambiadores de calor en superficie, una vez que el fluido cede el calor se reinyecta al subsuelo con el fin de reutilizar esta fuente de forma continua.

Mediante un pozo productor se bombean estas aguas hacia la bomba de calor y, una vez utilizadas para ceder el calor transportado en el evaporador, se devuelven al acuífero a través de un pozo de inyección y evitar que éste se agote, Figura 1.5. Esta opción es la más interesante desde un punto de vista económico e idóneo cuando existen acuíferos aledaños a la zona de interés (Wigth & Bennett, 2015).



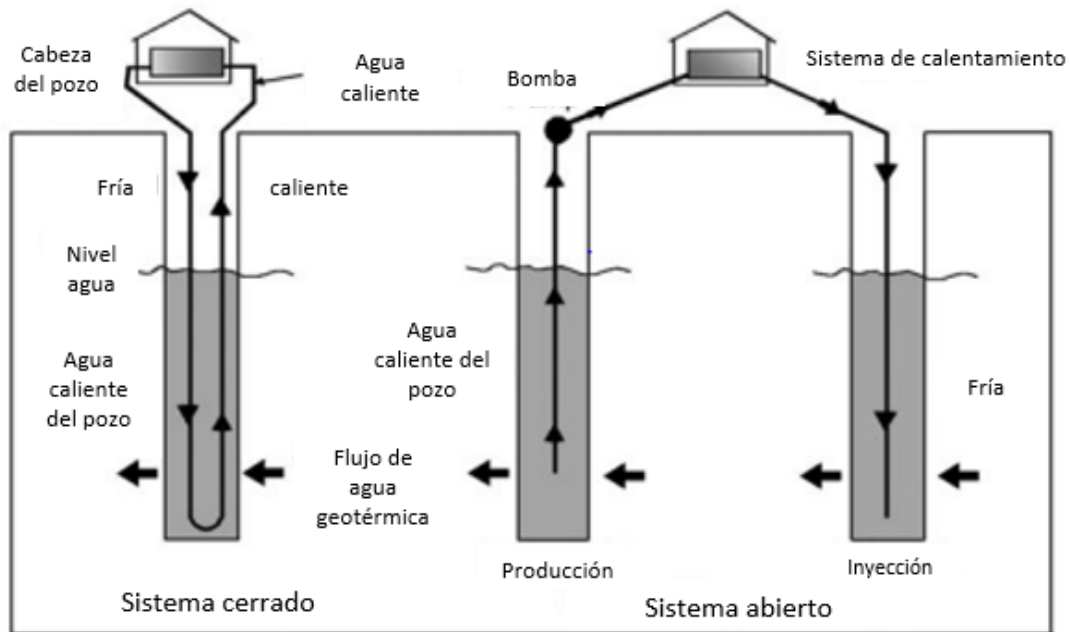


Figura 1.5. Ejemplo básico de un sistema abierto y un sistema cerrado utilizados para la climatización de casas. (Friedman, 2009)

Dentro de la industria geotérmica la generación de energía eléctrica es una forma muy atractiva de aprovechar esta fuente de energía, para el desarrollo eléctrico son necesarias temperaturas por encima de los 150°C en cuanto el uso de plantas eléctricas convencionales, sin embargo, mediante la aplicación de plantas de ciclo binario es posible generar energía eléctrica si se tiene temperaturas mayores a los 85°C. (Mary H. Dickson y Mario Fanelli, 2003).

Respecto a fuentes que van de media a baja temperatura existen diferentes tipos de aplicaciones que varían de acuerdo con la temperatura, estos posibles usos pueden observarse detalladamente en el diagrama de Lindal. Figura 1.6.

Como se puede observar en el diagrama la mayor parte de las aplicaciones en cuestión de usos directos se concentran en rangos de temperatura moderados y bajos es decir entre aproximadamente 50 °C y 150 °C, esto representa un beneficio importante en la aplicación de usos directos ya que dicho rango de temperaturas suele ser más abundante en comparación con las altas temperaturas requeridas para la generación eléctrica. (Fanelli, 2003)

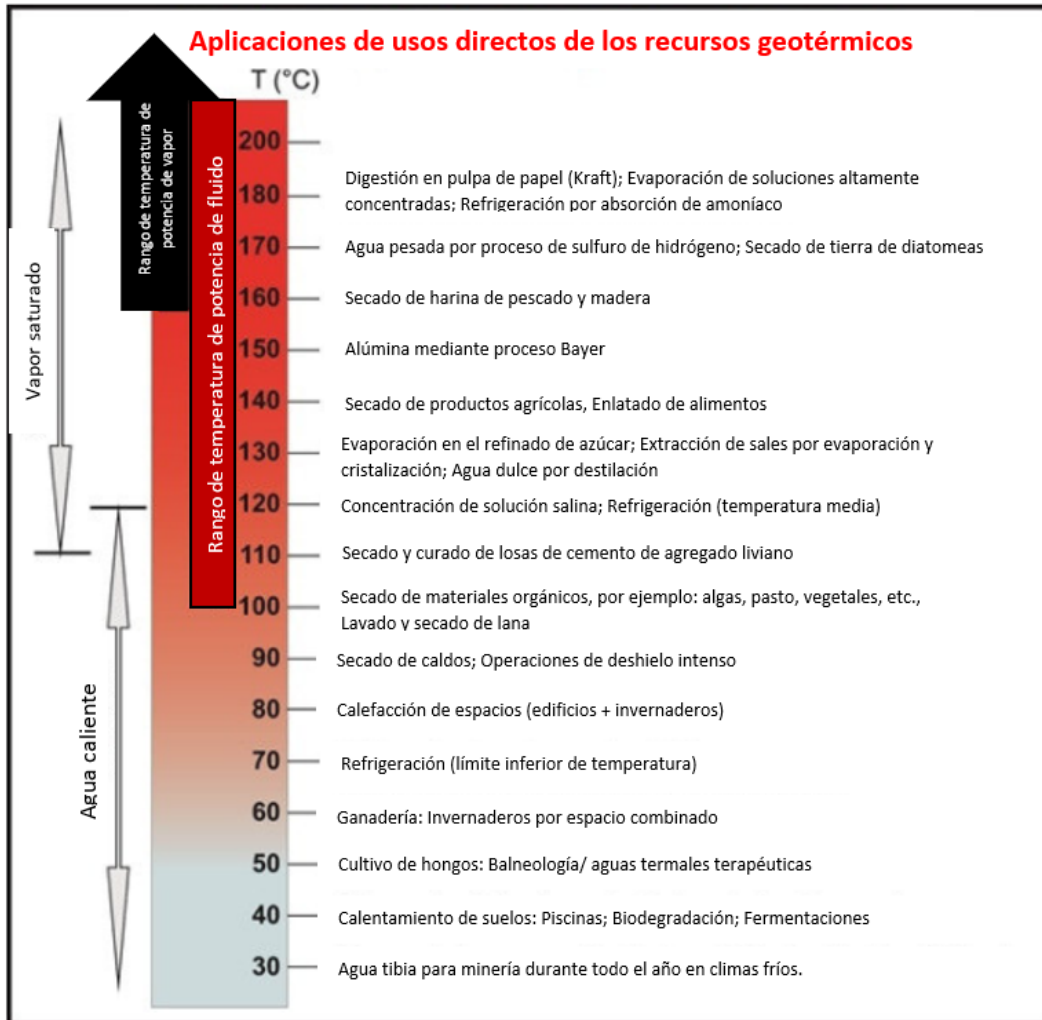


Figura 1.6. Diagrama de Lindal. (Australian Academy of Science, 2018)

1.2.1 Generación Eléctrica

La generación de energía eléctrica involucra a las turbinas convencionales de vapor y a plantas de ciclo binario, la elección de que sistema se utilizará dependerá de las características del sistema geotérmico.

Una turbina de vapor funciona con fluidos con temperaturas por encima de los 150 °C. Existen las turbinas con escape atmosférico y con escape de condensación. (Fanelli, 2003)



Las turbinas de escape atmosférico son generalmente más económicas y sencillas, en este tipo de turbinas el vapor que viene de los pozos es procesado directamente y se expulsa a la atmosfera, el inconveniente con este tipo de unidades es que el vapor utilizado para generar un kilowatt por hora es casi el doble en comparación con las unidades de condensación, es por esto que dicho sistema es utilizado principalmente en las plantas piloto debido a su facilidad de instalación y a el bajo costo del equipo. De igual forma son utilizadas en casos en los que el vapor contiene una alta cantidad de gas no condensable ($>12\%$). (Fanelli, 2003)

Las turbinas de condensación son unidades más complejas y que se componen de equipos auxiliares esto complica su instalación, aumenta el tamaño de la unidad e incrementa su costo. “Plantas de condensación con capacidad de 55 a 60 MWe son muy comunes sin embargo también existen plantas de 110 MWe” (Fanelli, 2003)

Las plantas de Ciclos Orgánicos Rankine (ORC) son útiles cuando se tiene fluidos de media y baja entalpia, estas plantas utilizan un fluido secundario (orgánico), generalmente n-pentano, el cual a diferencia del vapor tiene un punto de ebullición bajo y una presión de vapor alta a bajas temperaturas. En estos sistemas el fluido geotérmico cede calor al fluido orgánico por medio de intercambiadores de calor, aquí el fluido es calentado hasta evaporizarse, el vapor producido genera un flujo axial normal en la turbina donde se transforma en energía mecánica y genera electricidad en el generador, posterior a esto pasa a un condensador donde se enfría y condensa, y el ciclo comienza nuevamente. Figura 1.7.

Las ventajas en el uso de un sistema binario en comparación con las unidades convencionales de vapor es que se pueden aplicar en temperaturas de entre 85°C y 170°C . (Fanelli, 2003)



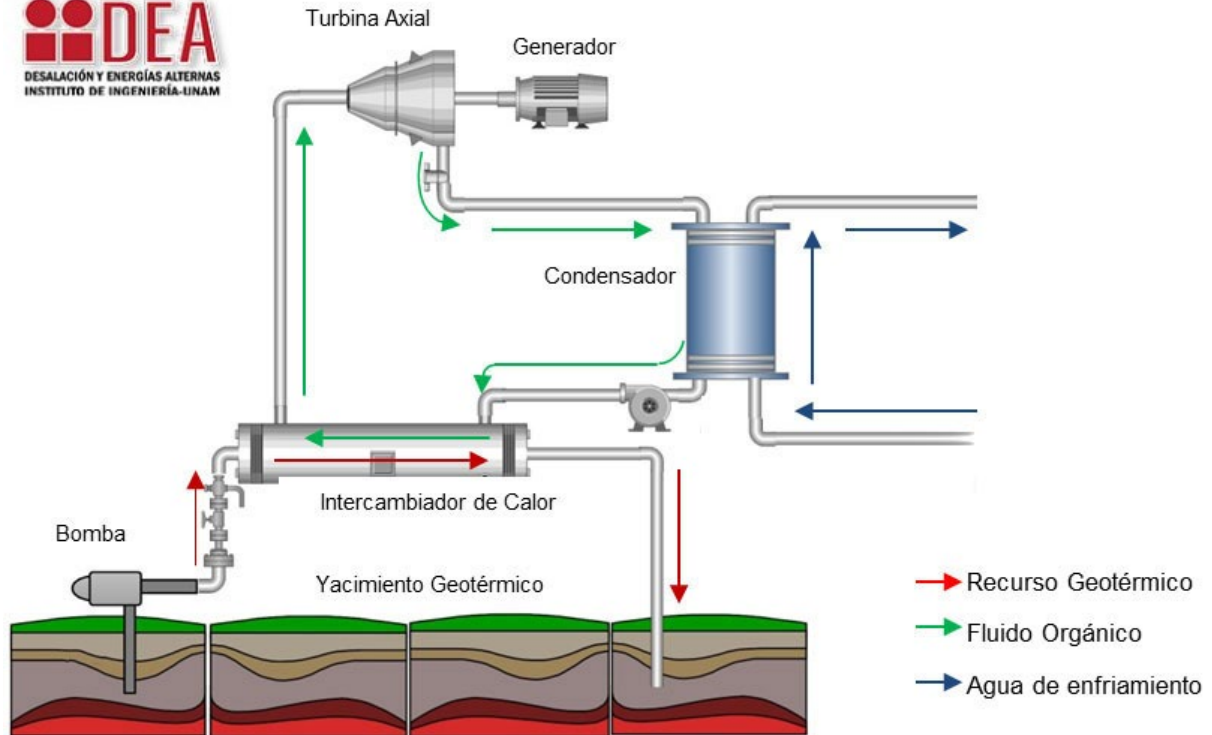


Figura 1.7. Intercambiador de calor de Evaporación Instantánea. (IIDEA, consultado 2021)

1.2.1.1 Generación eléctrica en México

En territorio mexicano el principal uso de energía geotérmica es la generación eléctrica. “Esta ha sido la situación general de la energía geotérmica en este país prácticamente desde 1959, cuando la primera planta geotérmica comenzó a operar en la zona geotérmica de El Pathé localizada en la zona central de México con 3.5 MWe de capacidad.” (Gutiérrez-Negrín L. M.-G.-L., 2015)

A pesar de los importantes recursos geotérmicos con los que cuenta México el aprovechamiento de dichas fuentes ha sido poco satisfactorio, “Comparado con 2013, la capacidad eléctrica geotérmica instalada en el 2019 ha decrecido en 1.1. %” (Gutiérrez- Negrín et al., 2015). Aun así, de acuerdo con datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA), México ocupa el cuarto lugar en Latinoamérica con mayor producción de energía geotérmica instalada, aproximadamente 958 MW, los cuales representan el 7% de toda la producción mundial.



Es importante mencionar que aproximadamente el 97% de la capacidad geotermoeléctrica instalada le pertenece a la estatal CFE (Comisión Federal de Electricidad) y el resto de las plantas en operación son operadas por empresas privadas. (Gutiérrez-Negrín L. C.-J.-L., 2020)

1.2.2 Usos Directos

Los usos directos, son unas de las formas más antiguas, versátiles y también las más comunes de manejar la energía geotérmica (Fanelli, 2003)

Existen varios usos actualmente de la energía geotérmica que han sido aplicados alrededor del mundo y que han presentado beneficios energéticos bastante placenteros. En la figura 1.8 se muestra un gráfico comparativo de los principales usos directos de la energía geotérmica de un estudio realizado por John W. Lund y Aniko N. Toth en mayo 2020.

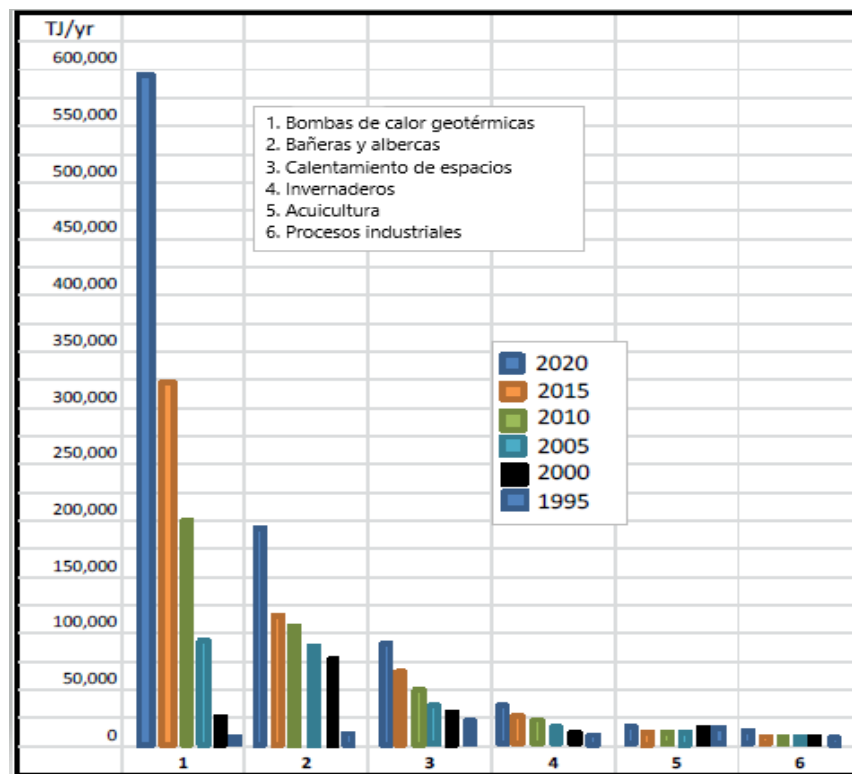


Figura 1.8. Comparación del uso directo mundial de energía geotérmica en TJ / año desde 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 y 2020. (Toth, 2020)



1.2.2.1 Bombas de calor geotérmicas

Las bombas de calor geotérmicas (de fuente terrestre) tienen el mayor uso geotérmico en todo el mundo, representando el 71,6% de la capacidad instalada. y el 59,2% del consumo energético anual. Aunque la mayoría de las instalaciones ocurren en América del Norte, Europa y China, el número de países con instalaciones ha aumentado de 26 en 2000, a 33 en 2005, a 43 en 2010, a 48 en 2015 y a 54 en 2020. (Toth, 2020)

Con base en lo reportado en instalaciones de bombas de calor podemos observar que el número de países prácticamente se ha duplicado en los últimos 20 años. El aumento en las instalaciones a nivel mundial se debe al tipo de temperaturas que se pueden aprovechar, “ya que se pueden instalar en cualquier lugar utilizando temperaturas normales del suelo y del agua subterránea entre 5° y 30 °C”. (CanGEA, 2014)

Las bombas de calor pueden ser instaladas incluso en pozos de hasta 100 metros de profundidad en el caso de un sistema cerrado, o en aguas subterráneas poco profundas para el caso de sistemas abiertos, en la figura 1.9 se pueden apreciar las típicas instalaciones de bombas de calor antes mencionadas.

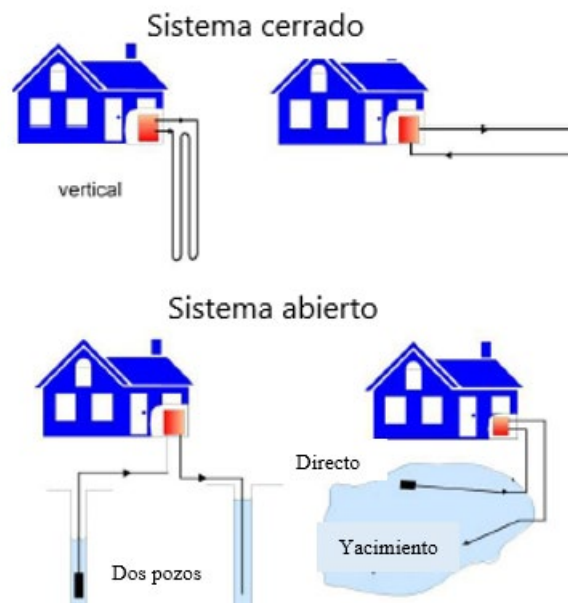


Figura 1.9. Instalaciones típicas de bombas de calor geotérmica.
(CanGEA, 2014)

1.2.2.2 Acondicionamiento de espacios

El acondicionamiento de espacios involucra la calefacción y refrigeración de espacios individuales, tales como casas o edificios, sin embargo, la calefacción suele ser más popular debido a que en el caso de refrigeración de espacios de acuerdo con la CanGEA es requerida una mayor temperatura y genera una baja eficiencia en el proceso, no obstante, existen casos en los que fue posible usar bajas y moderadas temperaturas geotérmicas para obtener buenos resultados. (CanGEA, 2014)

Una importante consideración en el diseño de sistemas de calefacción con fuentes geotérmicas es el uso de intercambiadores de calor de fondo, dichos intercambiadores eliminan la disposición de un fluido geotérmico de manera que solo el calor es extraído del pozo. Un intercambiador de calor consiste en un sistema de tuberías que se encuentran suspendidas en el pozo, por las cuales se bombea un fluido, en la mayoría de los casos agua, la cual transporta calor por transferencia convectiva.

La figura 1.10 es un ejemplo de la instalación de un intercambiador de fondo en *Klamath Falls, Oregon.* El sistema proporciona calefacción espacial, agua caliente para duchas y baños para un Edificio de 7.844 m², con una carga máxima de 2,3 GJ / h (0,67 MWt) y 5,0 TJ / año ahorrando US \$ 69.000 por año”. (Toth, 2020)

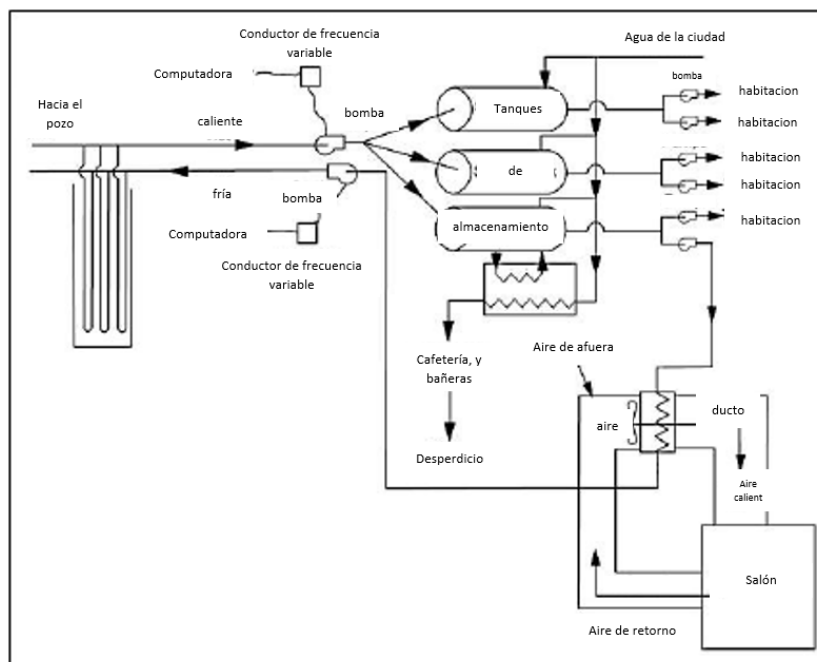


Figura 1.10. Sistema de intercambiador de calor de fondo en la escuela secundaria Ponderosa, Klamath Falls, Oregon.



1.2.2.3 Calentamiento de estanques y acuicultura

La acuicultura se define como la cría controlada de especies acuáticas y el control de las temperaturas que afectan a su crecimiento y reproducción es un factor importante en el desarrollo de esta actividad económica, puesto que la demanda mundial aumenta constantemente. “El control de la temperatura en la cría de especies acuáticas es de mayor importancia en comparación con las especies terrestres.” (Fanelli, 2003)

“Veintiún países informan sobre este tipo de uso, siendo los principales en términos de uso anual de energía China, Estados Unidos, Islandia, Italia e Israel los mismos países informaron en WGC2015, representando el 92% del uso anual.” (Toth, 2020)

1.2.2.4 Invernaderos

Dentro de las aplicaciones de la energía geotérmica en la agricultura, los invernaderos son el uso más común y que se ha desarrollado en diferentes países. “Un total de 32 países reportan invernaderos geotérmicos (en comparación con 31 países de WGC2015), siendo los países líderes en uso de energía anual (TJ / año) Turquía, China, Holanda, Rusia y Hungría, que representan alrededor del 83% del total mundial” (Toth, 2020)

Usar energía geotérmica para la calefacción reduce los costos operativos (que pueden representar hasta el 35% del costo del producto), y permite la operación en climas más fríos donde un invernadero comercial que utiliza combustibles fósiles para la calefacción normalmente no sería económico. (Boyd, 2008).

1.2.2.5 Procesos industriales de calor

La aplicación de la energía geotérmica en procesos industriales es demasiado escasa debido al gran consumo de energía aunado a la falta de conocimiento en los beneficios de esta fuente y la viabilidad de perpetuar el uso de combustibles fósiles en el desarrollo de procesos industriales. Algunos ejemplos de esta aplicación incluyen curado del hormigón (Guatemala y Eslovenia), embotellado de agua y bebidas carbonatadas (Bulgaria, Estados Unidos y Serbia), pasteurización de la leche (Rumania y Nueva Zelanda), industria del cuero (Serbia y Eslovenia), extracción química (Bulgaria, Polonia y Rusia), extracción de CO₂ (Islandia y Turquía),





procesamiento de pulpa y papel (Nueva Zelanda), extracción de yodo y sal (Vietnam) y producción de borato y ácido bórico (Italia).

“La capacidad instalada es de 852 MWt y el uso de energía es de 16,390 TJ / año, un aumento de 38,8% y 56,8% respectivamente, en comparación con WGC2015.” (Toth, 2020)

1.2.2.6 Bañeras y albercas

Las bañeras o albercas provistas de agua geotérmica han existido durante muchos años y son muy comunes alrededor del mundo ya sea para aspectos recreativos, como clubes acuáticos, spas o hasta para tratamiento de enfermedades por medio de prácticas con agua mineral proveniente del subsuelo. Figura 1.11.

“Casi todos los países (53 de 88) tienen spas y complejos turísticos con piscinas calentadas por agua geotérmica, incluida la balneología, el tratamiento de enfermedades con agua, pero muchas no regulan el flujo de agua, incluso por la noche cuando la piscina está cerrada algunos países no realizan un seguimiento del uso de la piscina.” (Toth, 2020)



Figura 1.11. Bañera geotérmica en Blue Lagon, Islandia. (Piensa en Geotermia)



2. SITUACIÓN PETROLERA ACTUAL EN MÉXICO

El presente capítulo aborda una descripción breve sobre la industria de los hidrocarburos en México y su desarrollo a lo largo del tiempo enfocándose principalmente en el cambio de la industria en el país a partir de la Reforma Energética, la regulación en materia legal que esta transición generó y el presente estado de los pozos existentes a lo largo del territorio nacional, así como el tipo de modalidad por la cual están siendo producidos o resguardados. El capítulo tiene como fin demostrar la cantidad de pozos fuera de producción con los que cuenta el país y como se encuentran distribuidos en las provincias petroleras.

2.1 Historia de la regulación petrolera.

El inicio de la industria Petrolera en México surge en el 3 de abril de 1904, cuando se descubre el primer campo petrolífero de dimensión comercial, cerca de *El Ébano, San Luis Potosí*. Años después se funda la compañía petrolera *El Águila*, dando así participación al sector privado en las primeras apariciones de la industria en México, de esta manera en el año de 1910 se llegó a una producción de 100, 000 barriles diarios.

El 18 de marzo de 1938 el presidente Lázaro Cárdenas decreta la expropiación de los bienes propiedad de las compañías petroleras. Un año después se forma Petróleos Mexicanos empresa del estado y a partir de entonces se encargaría de la producción de hidrocarburos en el país. Años más tarde en 1958 los contratos son prohibidos y Pemex es puesto como único operador por más de 30 años, a finales del siglo XX se permite la participación limitada del sector privado en la industria petrolera por la implementación de nuevas reformas. (Axel Ramsés Davidovich Castellanos, 2018)

“A lo largo de 76 años la industria del petróleo y gas, permanecieron sin cambios al contrario de otros países que implementaron sus primeras rondas de licitación abriendo al mercado externo su industria del petróleo y gas como Brasil, Colombia y Noruega”. (ENRÍQUEZ, 2013)

La industria petrolera en México se encontraba regida por la empresa estatal PEMEX, la cual es un órgano descentralizado que se dedica a administrar las actividades de upstream y downstream de los hidrocarburos dentro y fuera de México. Para su funcionamiento se encuentra dividida en cinco organismos principales: Pemex Exploración y Producción, Pemex Refinación, Pemex Gas





y Petroquímica Básica, Pemex Petroquímica y PMI Comercio Internacional, S.A. de C.V. (MexMedia Group, 2013). Descrito lo anterior la estructura institucional antes de la Reforma se muestra en la Figura 2.1.

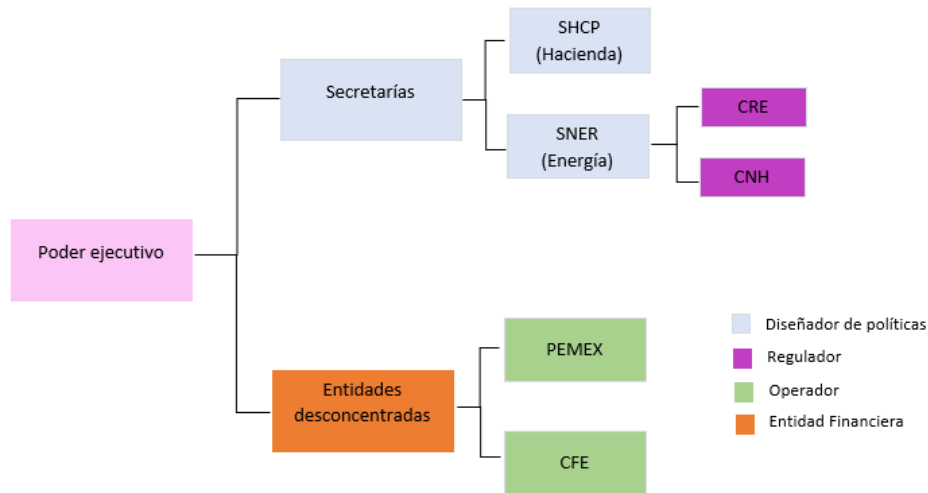


Figura 2.1. Modelo regulatorio en México antes de la Reforma Energética fuente adaptada de la Comisión Reguladora de Energía (CRE).

En diciembre de 2013 entra en vigor la Reforma Energética la cual buscaría la apertura de la industria petrolera en México con la entrada de empresas privadas al sector de hidrocarburos, dicha reforma abarcó 4 rondas, la ronda cero (áreas donde Pemex se quedaría de manera exclusiva para su explotación y exploración de hidrocarburos), contratos con terceros y contrapresiones (aquella que se establezca en cada Contrato a favor del Estado o del contratista), la ronda 1, 2, 3 y 4 en las cuales incorpora la posibilidad de otorgar contratos a empresas privadas, permitiendo poner en producción yacimientos de hidrocarburos que en la actualidad se encuentran ociosos por falta de inversión, de capacidad de ejecución y de tecnología.

2.2 Regulación actual

A partir del 2018 las licitaciones realizadas como resultado de la Reforma Energética fueron detenidas por el gobierno en vigor respetando los contratos y el marco legal vigente en el cual los privados podrían seguir participando en el sector como contratistas de Petróleos Mexicanos (Pemex).

“En un memorándum emitido el 22 de julio del 2020 por el titular del Poder Ejecutivo Federal, se afirma que los órganos de regulación deben ajustarse a la nueva política económica y





energética, y que su misión debe ser la de sumar esfuerzos con la Secretaría de Energía, Pemex y la CFE para rescatar la industria del petróleo y electricidad de la nación.” (Organo oficial de la camara de diputados del congreso de los Estados Unidos Mexicanos , 2021)

De esta forma el sistema regulatorio de la industria petrolera en México es un modelo separado de funciones (figura 2.1) donde participan entes gubernamentales como;

Secretaría de Energía (SENER):

- Conducir la política energética del país, dentro del marco constitucional vigente, para garantizar el suministro competitivo, suficiente, de alta calidad, económicamente viable y ambientalmente sustentable de energéticos que requiere el desarrollo de la vida nacional.

Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH):

- Regular y supervisar el reconocimiento y la exploración superficial, así como las actividades de E&E, incluyendo recolección des de los puntos de producción y hasta su integración al sistema de transporte y almacenamiento;
- Licitación y suscribir los CEE;
- Administrar, en materia técnica, las Asignaciones y CEE, y
- Prestar asesoría técnica a la SENER

Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA):

- La protección de las personas, el medio ambiente y las instalaciones del sector hidrocarburos a través de la regulación y supervisión de:
 - a) La Seguridad Industrial y Seguridad Operativa;
 - b) Las actividades de desmantelamiento y abandono de instalaciones, y
 - c) El control integral de los residuos y emisiones contaminantes.



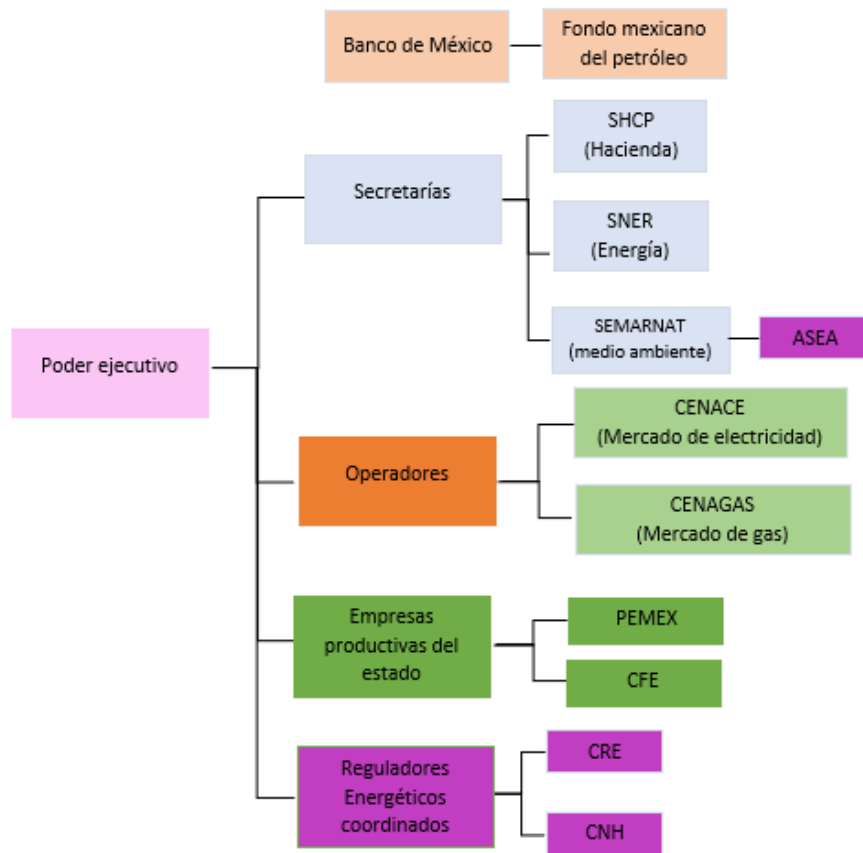


Figura 2.2. Modelo regulatorio en México, fuente adaptada de la Comisión Reguladora de Energía (CRE)

Existen otras entidades que participan en el día a día de la industria de los hidrocarburos, como son;

Comisión Reguladora de Energía:

- Regular y promover el desarrollo de las siguientes actividades:
 1. Las de transporte, almacenamiento, distribución, compresión, licuefacción y regasificación, así como el expendio al público de petróleo, gas natural, gas licuado de petróleo, petrolíferos y petroquímicos;
 2. El transporte por ductos, almacenamiento, distribución y expendio al público de bioenergéticos, y
 3. La generación de electricidad, los servicios públicos de transmisión y distribución eléctrica, la transmisión y distribución eléctrica que no forma parte del servicio público y la comercialización de electricidad.





Fondo Mexicano del Petróleo:

- El Fondo tiene como objeto recibir, administrar, invertir y distribuir los ingresos derivados de las asignaciones y los contratos para la exploración y extracción de hidrocarburos, con excepción de los impuestos.

2.3 Estudio de los pozos petroleros y sus condiciones actuales en México

2.3.1 Provincias petroleras

México cuenta con una gran cantidad de zonas petroleras, la mayoría se concentran en la costa del golfo de México, dichas áreas corresponden a grandes cuencas sedimentarias donde se acumuló gran cantidad de materia orgánica que dio origen a los hidrocarburos.

En México se reconocen 12 provincias petroleras Figura 2.2, seis provincias productoras (Sabinas-Burro-Picachos, Burgos, Tampico-Misantla, Veracruz, Sureste y Golfo de México Profundo) y seis provincias con potencial medio-bajo (Plataforma de Yucatán, Cinturón Plegado de Chiapas, Cinturón Plegado de la Sierra Madre Oriental, Chihuahua, Golfo de California y Vizcaíno-La Purísima-Iray).



Figura 2.2. Provincias petroleras en México. Pemex 2013





2.3.2 Pozos de hidrocarburos en México.

Con más de un siglo de perforación, México tiene un aproximado de 32,000 pozos perforados en territorio nacional. La mayoría de estos pozos fueron desarrollados por la empresa del estado PEMEX, no obstante, en los últimos años algunas empresas privadas se han sumado en la perforación de pozos. En la figura 2.3 podemos observar que en el año 2019 el 13% de los pozos petroleros fueron perforados por empresas privadas, la participación de estas ha aumentado paulatinamente desde las licitaciones realizadas por la Reforma Energética del 2013, ya que anterior a este régimen en la industria PEMEX tenía el control de todas las actividades petroleras.

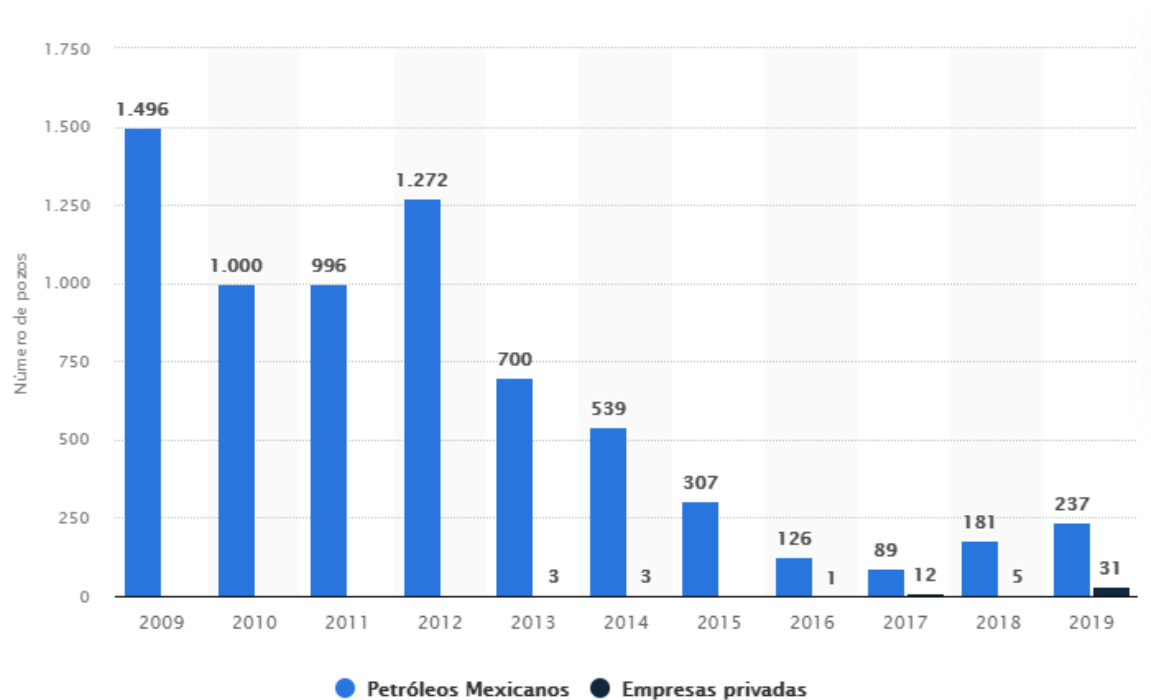


Figura 2.3. Pozos perforados en México de 2009 a 2019 por operador, Statista 2021, <https://es.statista.com/estadisticas/1135387/pozos-petroleros-perforados-por-operador-mexico/>



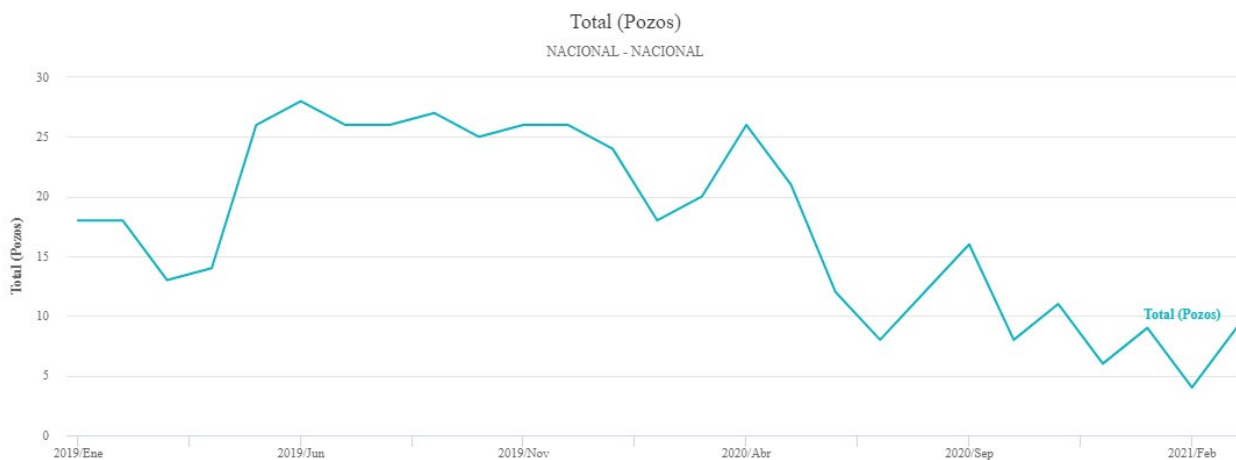


Figura 2.4. Pozos perforados en México de enero 2019 a marzo 2021, CNH 2021, <https://sih.hidrocarburos.gob.mx/>

La Figura 2.4 muestra el número de pozos a nivel nacional perforados, incluidos pozos de desarrollo y de exploración, de enero de 2019 a marzo de 2021, de acuerdo con datos de la CNH se han reportado 477 nuevos pozos hasta marzo del 2021.

2.3.3 Condición de los pozos actualmente.

Actualmente de acuerdo con datos provenientes del Mapa de Hidrocarburos de la CNIH hasta Julio de 2021, el territorio mexicano cuenta con 33,355 pozos, distribuidos entre las zonas de Burgos, Tampico- Misantla, Veracruz, Cuencas del Sureste, Aguas Someras y Aguas profundas. (CNH, 2021)

La cantidad total de pozos involucra pozos abandonados temporal y permanentemente, cerrados, en espera de abandono, inactivos, inyectoros (ya sea para recuperación mejorada o secundaria), productores, suspendidos y taponados. En la figura 2.5 se muestra la cantidad total de pozos que hay por cada zona petrolera.



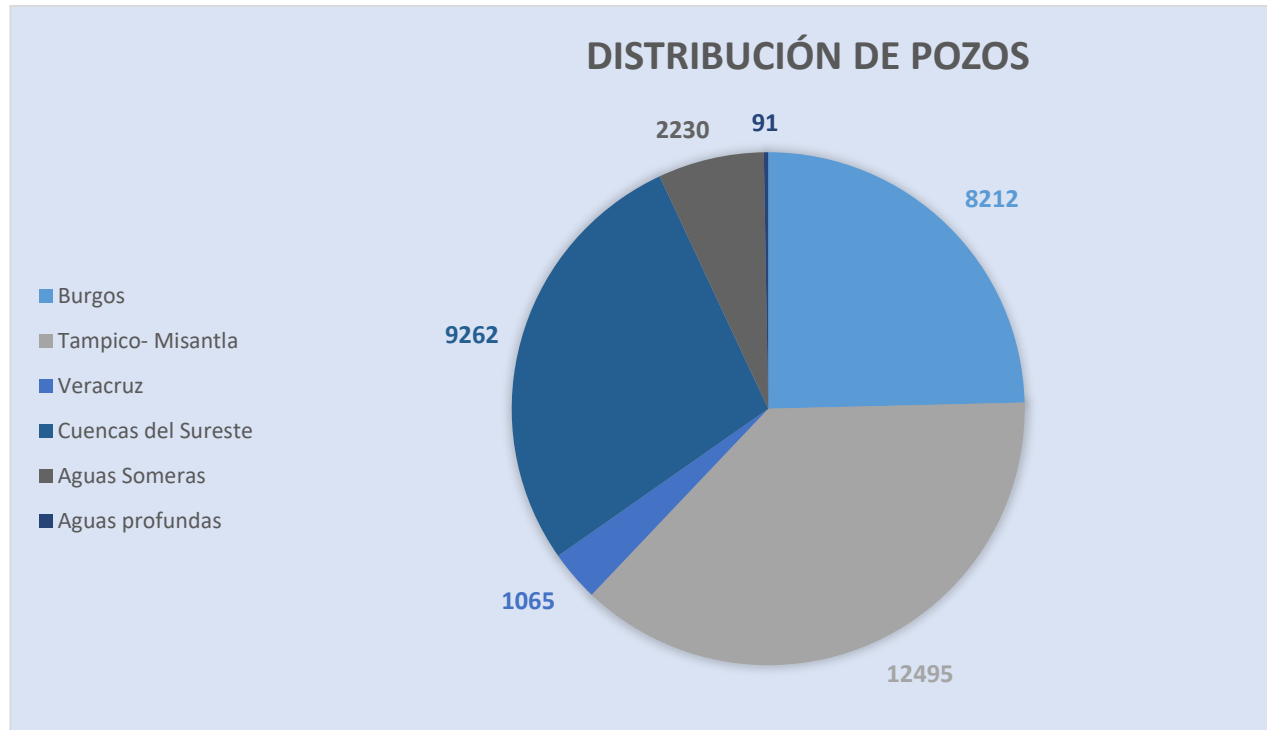


Figura 2.5. Distribución de pozos en México, CNH 2021, <https://sih.hidrocarburos.gob.mx/>

2.3.4 Clasificación de pozos por su condición actual

El total de pozos existentes está clasificado de acuerdo con su condición actual, dicha clasificación contiene las siguientes definiciones:

Abandono permanente: Abandono que incluye el taponamiento definitivo del Pozo una vez que concluyen las operaciones para las que éste fue autorizado.

Abandono temporal: Abandono que se realiza en Pozos que tienen la posibilidad de incorporarse a producción de Hidrocarburos en el futuro, o ser usados con otro fin diferente al de producción, con el objetivo de mantener la Integridad.

Inactivo: Es aquel Pozo que no es capaz de producir bajo ningún método de producción o cuya producción ya no es rentable.

Productor: Pozo a través del cual se extraen Hidrocarburos en condiciones estabilizadas y sustentadas mediante pruebas de producción. Dicho Pozo pudo estar comprendido en la categoría de Pozo Exploratorio y, como resultado de una modificación a su Diseño, se reubica en la categoría de Pozo de Desarrollo.





Suspendido: Es aquel Pozo Productor que es cerrado y se encuentra esperando una reparación para cumplir con las metas establecidas de producción.

En este caso los pozos de interés se reducen a aquellos que presenten un gradiente geotérmico anómalo o que en su caso las condiciones de profundidad y temperatura sean adecuadas para alguna aplicación geotérmica, preferentemente dichos pozos deben encontrarse en zonas terrestres, ya que existe mayor factibilidad de intervenir o modificar dichos pozos.

En la tabla 2.1 en conjunto con la figura 2.6 se muestra un desglose detallado de la condición actual de los pozos por cada zona basado en el Mapa de Hidrocarburos de la CNIH, esta clasificación permite discernir la gran cantidad de pozos inactivos que de acuerdo con las definiciones su estado es causado por la baja rentabilidad del pozo, de igual forma aunque son minoría se encuentran los pozos abandonados permanentemente que pueden ser muy útiles para implementar métodos geotérmicos de ciclo cerrado para aprovechar el calor en las profundidades de los pozos, por último pero de igual importancia son los pozos de abandono temporal que de acuerdo a su definición pueden ser usados para otros procesos que no tengan que estar relacionados directamente con la producción de hidrocarburos o que en su caso se rehabiliten mediante tecnologías futuras.

	Burgos	Tampico- Misantla	Veracruz	Cuencas del Sureste	Aguas Someras	Aguas profundas
Abandono permantente	26	7	2	15	83	33
Abandono temporal	88	194	45	454	25	12
Inactivo	5472	9445	794	7417	898	0
Productor	2595	2738	202	1045	596	0
Suspendido	15	94	17	294	6	0
Restantes	16	17	5	37	622	46
Total	8212	12495	1065	9262	2230	91

Tabla 2.1. Estado de los pozos por zona. CNH, 2021. <https://mapa.hidrocarburos.gob.mx/>



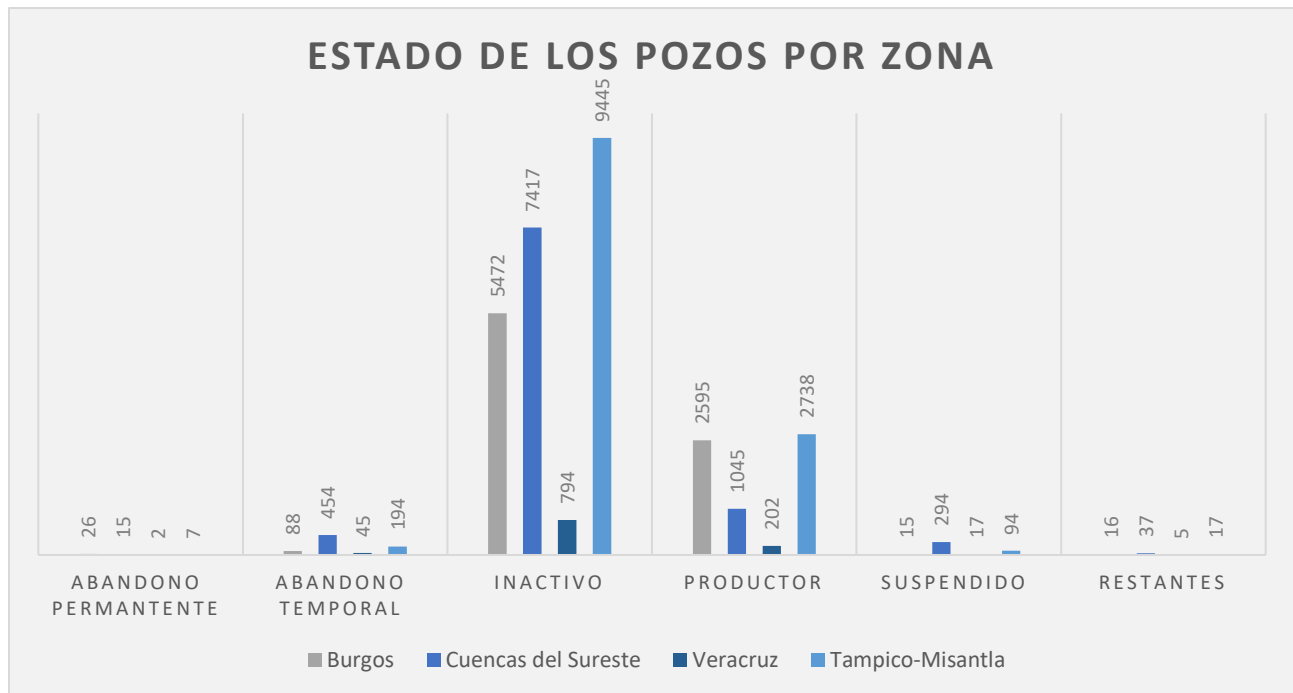


Figura 2.6. Estado de los pozos por zona. CNH, 2021. <https://mapa.hidrocarburos.gob.mx/>

Los pozos productores en Burgos representan el 7.77% del total, el 8.2% en Tampico-Misantla, 3.1% en la zona de Veracruz y el 0.6% en las Cuencas de Sureste, estos datos son desalentadores si los vemos desde el punto de vista petrolero, pero desde una perspectiva geotérmica alientan las posibilidades de encontrar pozos característicos para el uso de una energía renovable y prometedora.

2.3.5 Regulación y control de pozos en México.

La reforma energética de 2013 trajo consigo cambios importantes en materia de pozos, anterior a esta solo PEMEX podía perforar pozos y producir hidrocarburos, sin embargo, los contratos resultados de las licitaciones realizadas en los años posteriores a la entrada en vigor de la Reforma Energética permitieron a empresas privadas (extranjeras y nacionales) participar en las actividades petroleras incluyendo la perforación y uso de pozos ya existentes en las áreas adjudicadas.





De acuerdo con datos de la CNH a lo largo de las 3 Rondas se concretaron 111 contratos vigentes de exploración y extracción de hidrocarburos de los cuales 5 pertenecen a migraciones de Pemex (asignación a contrato), distribuidos en 73 empresas licitantes. De las 111 áreas 51 corresponden a zonas terrestres, 32 a aguas someras y 28 a aguas profundas. (CNH, 2021).

De los 111 contratos 77 corresponden a la modalidad de licencia y 35 a producción compartida (con un contrato terminado), dentro de todas estas áreas ofertadas existen numerosas cantidades de pozos; inactivos y abandonados, que bien podrían ser modificados para diferentes usos geotérmicos.

De acuerdo con los “Lineamientos de perforación de pozos” emitidos por la CNH:

- En el artículo 8 se define que los operadores petroleros son responsables de todas las actividades relacionadas con la perforación de pozos, incluidas las actividades de diseño, construcción del pozo, Terminación, integridad, mantenimiento y abandono del pozo. De igual forma serán responsables de la integridad de los Pozos que perforen, así como de aquellos preexistentes que hayan sido aceptados como útiles al amparo de su Asignación o Contrato.
- En el artículo 15 se menciona que en el caso de reentrada a un pozo preexistente el operador no requerirá ninguna autorización por parte de la comisión, será necesario solo hacer un aviso por parte del operador a dicha comisión.

Con base en los criterios anteriores cada operador es responsable de los pozos a perforar, así como los pozos preexistentes otorgados por considerarse útiles, no obstante, a pesar de que dichos lineamientos ofrecen cierta libertad al operador en los pozos existentes existen otros aspectos que pueden complicar la extracción de calor en zona de hidrocarburos como el hecho de que los contratos de exploración y extracción están enfocados exclusivamente a hidrocarburos.

Dentro de las zonas de hidrocarburos los pozos pertenecientes a Pemex tendrían que ser evaluados por la compañía encargada de la explotación geotérmica en territorio mexicano para ver si de esta forma podrían ser explotados.

En la Ley de Energía Geotérmica se define a *Recurso Geotérmico* como recurso renovable asociado al calor natural del subsuelo, que puede ser utilizado para la generación de energía





eléctrica, o bien, para destinarla a usos diversos, y a *Yacimiento Geotérmico Hidrotermal* como a zona del subsuelo compuesta por rocas calientes con fluidos naturales, cuya energía térmica puede ser económicamente explotada para generar energía eléctrica o en diversas aplicaciones como son los usos directos.

Así mismo en esta ley se describe que tanto personas físicas como morales pueden ser acreedores de concesiones de explotación, tal como se describe en la sección quinta artículo 30.

2.3.6 Pozos abandonados en asignaciones y contratos de Pemex

Como resultado de la Ronda Cero Realizada por la Comisión Nacional de Hidrocarburos, Pemex adquiere una basta cantidad de asignaciones de las cuales actualmente existen 429 vigentes. (CNH, 2021).

Dichas asignaciones están distribuidas a lo largo de todas las zonas petroleras de México; Burgos, Tampico-Misantla, Veracruz, Cuencas del Sureste, Aguas Someras y Aguas Profundas. Por otro lado, Pemex realizó 5 migraciones, las cuales consisten en conmutar un área asignada a un contrato en cualquiera de sus modalidades (Licencia, Producción Compartida y Utilidad Compartida). De esta forma la empresa estatal cuenta con 429 asignaciones y 5 contratos en su modalidad de Producción Compartida para desarrollar actividades petroleras.

En todas estas áreas de Pemex se encuentran pozos petroleros que están bajo su control y resguardo, pozos productores, abandonados, inactivos y todos los que ya se han mencionado con anterioridad, en la tabla 2.2 se muestra un resumen del estado actual de los pozos que se encuentran en cada una de estas asignaciones vigentes de Pemex.

Pozos en Asignaciones Vigentes	Burgos	Tampico-Misantla	Veracruz	Cuencas del Sureste	Aguas Someras	Aguas profundas
Abandono permantente	3	6	2	12	72	20
Abandono temporal	61	154	45	377	10	11
Inactivo	3412	8120	648	5746	877	0
Productor	2144	2513	195	871	589	0
Suspendido	9	82	14	282	4	0
Restantes	3	13	5	32	499	32
Total	5632	10888	909	7320	2051	63

Tabla 2.2. Estado de los pozos en asignaciones por zona. CNH, 2021. <https://mapa.hidrocarburos.gob.mx/>



**2.3.7 Pozos abandonados en áreas contractuales de E&P privadas.**

De las tres modalidades existentes en los contratos petroleros actualmente la distribución de los pozos conforme a estado actual, zona y tipo de contrato se muestra en la tabla siguiente.

En esta tabla se puede observar que la mayor densidad de pozos se encuentra en estado inactivo o productor y en específico bajo una modalidad de licencia, cabe destacar que Burgos cuenta con una buena cantidad de pozos inactivos, y puesto que se sabe que las condiciones de temperatura y presión en esta zona pueden ser importantes para un desarrollo geotérmico resulta útil definir la modalidad en la que se encuentran dichos pozos.

Pozos en contratos vigentes	Burgos		Tampico-Misantla		Veracruz		Cuencas del Sureste		Aguas Someras		Aguas profundas	
	L	PC	L	PC	L	PC	L	PC	L	PC	L	PC
Abandono permantente	0	21	1	0	0	-	2	1	-	7	13	-
Abandono temporal	2	2	3	1	0	-	2	0	-	8	1	-
Inactivo	548	296	133	981	87	-	945	222	-	38	0	-
Productor	277	123	86	128	7	-	143	31	-	35	0	-
Suspendido	1	1	1	6	1	-	3	0	-	0	0	-
Restantes	6	7	3	0	0	-	3	0	-	77	7	-
Total	834	450	227	1116	95	-	1098	254	-	165	21	-

Tabla 2.3. Modalidad del contrato para cada estado actual de los pozos. CNH, 2021. <https://mapa.hidrocarburos.gob.mx/>





3 PROYECTOS GEOTÉRMICOS CON POZOS ABANDONADOS

En este capítulo se hablará de cómo surge el interés de aprovechar pozos petroleros para la industria geotérmica, su clasificación como pozos potenciales para dicho uso y el diseño básico de estos para su aplicación. Además, se revisarán las diferentes investigaciones y los proyectos realizados con pozos petroleros abandonados para aplicaciones geotérmicas, dentro del capítulo se indaga en una variación interesante de casos que partieron de la premisa de poder utilizar el calor de los pozos petroleros abandonados e incluso en algunos casos en pozos productores para generar ya sea energía eléctrica o aplicar algún uso directo. Finalmente se aborda el tema de regulación en materia de hidrocarburos y en materia energética en general de los principales países que han tenido éxito en el desarrollo de estos proyectos para poder comparar dichos regímenes con las leyes de México y así identificar las áreas de oportunidad o bien el camino que la industria debe seguir para comenzar el aprovechamiento del calor natural presente en pozos de hidrocarburos.

3.1 Pozos abandonados de hidrocarburos para extraer calor

Los pozos de petróleo abandonados comenzaron a llamar la atención del sector geotérmico hace apenas algunos años, se podría considerar que dicho interés es relativamente nuevo en comparación a la historia de la industria petrolera y la geotérmica como tal.

Los primeros indicios de metodologías catalogadas en cuanto a la recuperación de energía geotérmica de pozos petroleros se reportaron en la década de los 70's a través de patentes generadas por inventores en Estados Unidos, de ahí en adelante en distintos países como, Francia, Rusia, Japón, China, Estados Unidos, entre otros se dieron a conocer metodologías, investigaciones y proyectos enfocados a la recuperación de calor en pozos abandonados.

Los pozos de petróleo y gas abandonados (AOGW) con altas temperaturas de fondo de pozo contienen abundante energía geotérmica, que se puede adaptar a un nuevo sistema geotérmico para diferentes usos evitando el alto costo de perforación. Por lo tanto, recientemente algunos investigadores se concentran en la evaluación del desempeño de la





extracción de energía térmica de AOGW y generación de energía geotérmica usando AOGW con sistemas de ciclo de Rankine orgánico (ORC). (Yong-Le Nian, 2018)

Específicamente en México el interés en este tema recientemente comienza, pero representa una ventana de numerosas posibilidades para el aprovechamiento de esta fuente energética.

Estos pozos petroleros abandonados pueden ser propuestos para proyectos geotérmicos, lo que puede reducir los costos de inversión hasta más del 50%. La evidencia científica confirma que la mayoría de los pozos petroleros fueron perforados en áreas con gradientes geotérmicos relativamente altos, lo cual los hace una posible fuente renovable de energía geotérmica.” (O.M. Espinoza Ojeda, CeMIEGeo, 2019)

Sanyal y Butler mencionaron que existen 3 tipos de pozos potencialmente capaces de suministrar energía geotérmica para la generación de energía eléctrica. (Sanyal & Butler, 2010)

- 1) Pozo productor de petróleo o gas con un corte de agua.
- 2) Pozo de petróleo o de gas abandonado debido a un corte alto de agua.
- 3) Pozo de salmuera geopresurizado con gas disuelto.

Los pozos del caso uno son particularmente aquellos pozos que aun producen pero que el corte de agua representa una desventaja en su producción, en algunos países como Italia y Francia se ha sabido aprovechar esta desventaja para generar energía alterna a partir del agua producida.

Del caso se sabe que los altos cortes de agua han ocasionado durante años el cierre de pozos debido a la baja rentabilidad en la producción, tan solo en territorio nacional existen miles de pozos en tal estado y que cuentan con importantes gradientes geotérmicos.

El tercer caso y quizá el más interesante hace referencia a la geopresurización provocada por una aportación mayor a la usual de sedimentos detríticos a la formación, aunado a la presión ejercida por los fluidos en los poros y la dificultad de los fluidos a filtrarse de manera vertical o lateral, permitiendo que los estratos mantengan los fluidos durante la sedimentación aumenta de forma anormal la presión y la temperatura del medio. Figura 3.1



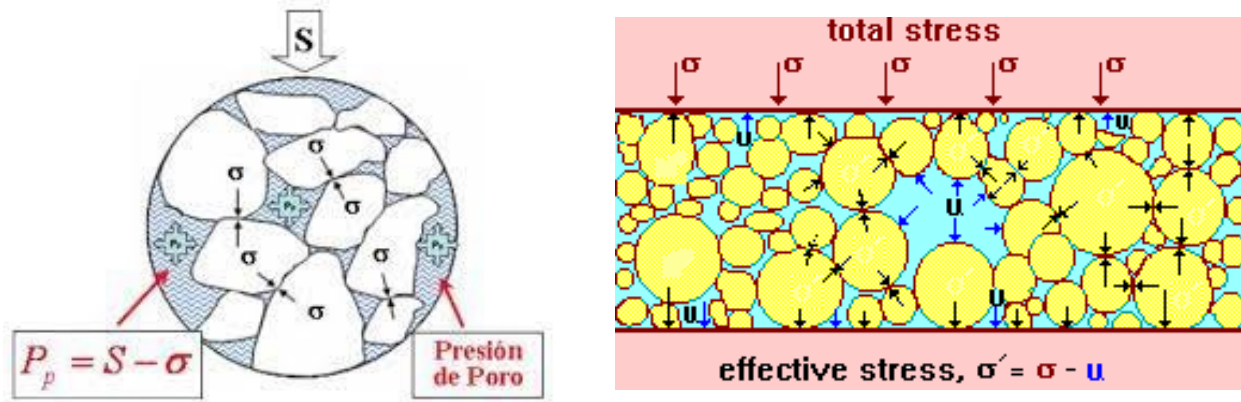


Figura 3.1. Presión de sobrecarga (Cruz, 2014).

“El calor es generado debido a que los estratos contienen mayor cantidad de agua o salmuera, el líquido, al no migrar del estrato depositado cuenta con una menor conductividad térmica (donde la capacidad calorífica volumétrica del agua es de $4.2[\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}]$ y de la arenisca es de $2.4 [\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}]$), logrando que el calor proveniente del centro de la tierra disipe lentamente el calor hacia la superficie, propiciando el efecto de almacenamiento de calor.” (Hunt, 1981).

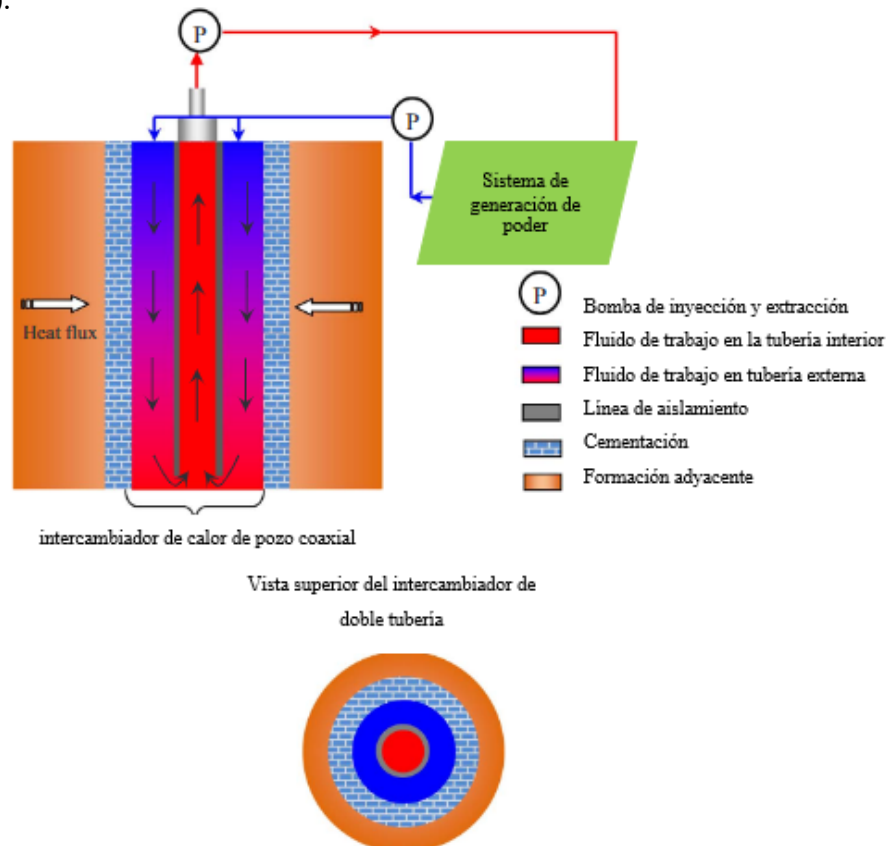


Figura 3.2. Esquema sobre la generación de poder a partir de un pozo petrolero abandonado. (Yong-Le Nian, 2018)



Básicamente la extracción de calor de un pozo de petróleo o gas abandonado (AOGW) se ilustra en la Figura 3.2, la cual muestra un pozo equipado con un intercambiador de calor coaxial “El fluido portador de calor circulante se inyecta en la tubería exterior (tubería de inyección) y se calienta por la formación circundante en su descenso, el cemento y el revestimiento se usan generalmente como escudo para evitar que el fluido entre en contacto con la formación.” (Yong-Le Nian, 2018)

Un pozo abandonado de gas o aceite es debido a su previo diseño un prospecto para la extracción de calor, aunado a esto la información geologica recolectada durante la explotación y exploración de estos pozos puede ser demasiado util en el proceso de analisis y diseño de un sistema geotérmico para la elección de los pozos más efectivos para esta tarea.

“Podemos agregar el hecho de que un pozo abandonado esta forzosamente regulado por las autoridades con el fin proteger el medio ambiente y mantener las áreas cercanas seguras, esto genera cargos extras a los operadores, sin embargo, generar energía a partir del agua coproducida es posible reducir los costos, los gastos operacionales e incrementar la recuperación final de hidrocarburos”.(Liu et al., 2018)

3.2 Revisión de ejemplos a nivel mundial

El concepto de extraer calor de pozos petroleros abandonados es un asunto que ha ido tomando lugar en la industria de los hidrocarburos, existen casos en los últimos años que han demostrado la posibilidad de aprovechar el calor existente de los pozos abandonados en campos maduros.

Kujawa et al. Son sin duda los pioneros en cuestión de utilización de pozos petroleros abandonados, en el 2000 presentaron una de las primeras publicaciones referentes al tema, donde se abordó principalmente la simplificación de los cálculos del intercambiador de campo (intercambiador de doble tubo), y de forma indirecta se mencionó la viabilidad de aprovechar en este caso un pozo exploratorio para la extracción de calor por medio de un ciclo cerrado, en el mismo año Barbacki publicaba su artículo titulado *The use of abandoned oil and gas wells in Poland for recovering geothermal heat* donde expuso la viabilidad de





aprovechar los pozos petroleros, así como los requerimientos que deben cumplir los campos de aceite y gas para dicho fin. Su publicación enfatiza la recuperación de los pozos abandonados por la invasión de agua debido a la maduración del campo.

Se discuten los supuesto iniciales esenciales para la estimación de flujo de calor transferido entre el depósito y un portador de calor y el flujo de calor permeable a través de una barrera, mediante la viabilidad de utilizar un pozo productor existente *Jachowka K-2*. (T. Kujawa, 2005).

Reyes A.G. realizó un estudio de reconocimiento en 2007 para evaluar el potencial de extraer energía geotérmica de pozos de petróleo y gas abandonados en regiones fuera de la zona volcánica *Taupo (TVZ)* y *Ngawha en Nueva Zelanda*.

Zhang, L., et al., mencionaban que las industrias petrolera y geotérmica estaban abarcando el auge en la producción y generación de energía, tras la preocupación en la longevidad y sustentabilidad de esta cúspide energética, indicaron que es posible adaptar los yacimientos petroleros a yacimientos geotérmicos excepcionales de altas temperaturas por medio de la oxidación del aceite remanente, “Especulamos que tanto la industria petrolera como la geotérmica crecerán mucho más según este estudio.” (Zhang, 2008)

El avance tecnológico y científico llevó a Davis, et al., a generar una simulación mediante un modelo computacional para la determinación de la producción de energía geotérmica de pozos petroleros abandonados mediante la inyección y recuperación de un fluido secundario. “El análisis toma en consideración los gradientes geotérmicos locales y las profundidades típicas de los pozos y los diámetros de las tuberías. Se elige isobutano como fluido secundario, que se inyecta en el pozo a presiones moderadas y se deja calentar y producir vapor.” (Davis, 2009)

Sanyal K., et al., realizaron un estudio más robusto en cuanto a los aspectos técnicos y económicos sobre la generación de energía de cada uno de los tres tipos de pozos que categorizan en su publicación; (a) un pozo de producción de petróleo o gas con un corte de agua, (b) un pozo de petróleo o gas abandonado debido a un alto corte de agua, y (c) un pozo de salmuera geopresurizada con gas disuelto. A partir de su investigación propusieron un diseño conceptual de una planta de poder híbrida afirmando que una vez que ambos fluidos,



tanto el gas como el agua geotérmica llegan a la cabeza del pozo la generación de poder eléctrico puede ser lograda fácilmente. Figura 3.3 (Sanyal & Butler, 2010)

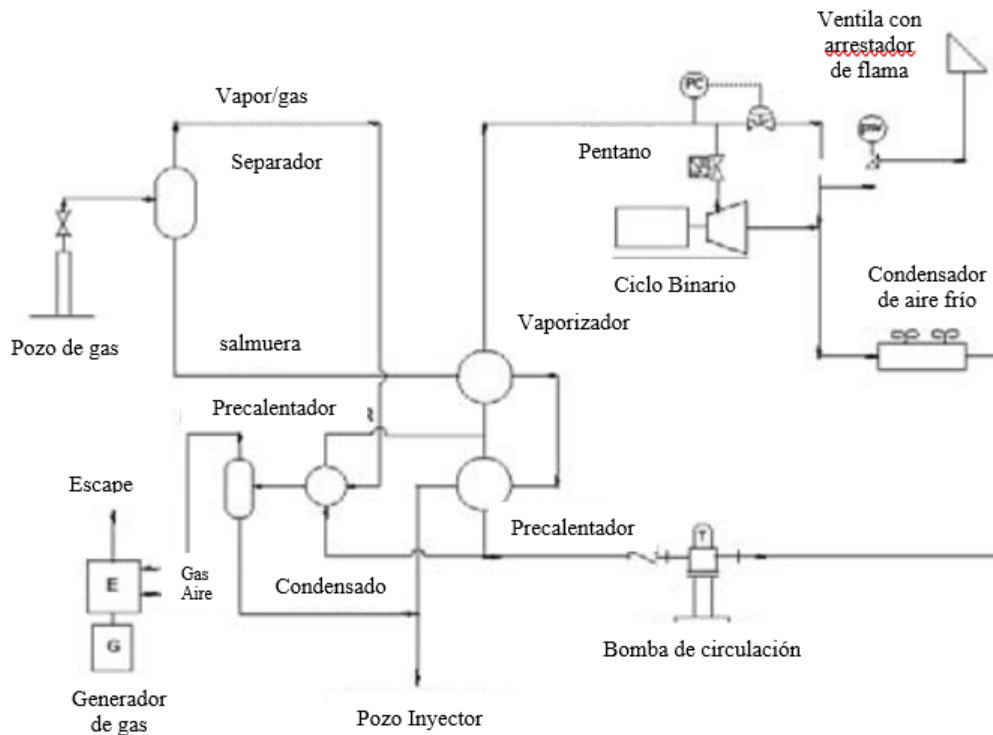


Figura 3.3. Esquema de una posible planta de generación eléctrica híbrida. (Sanyal & Butler, 2010)

Otro estudio basado en demostrar la factibilidad de adquirir energía geotérmica de pozos peroleros abandonados es el realizado por Xianbiao Bu, et al., en el cual por medio de un modelo matemático que describe el calor transferido de las rocas al fluido concluyen que la energía geotérmica proveniente de pozos abandonados depende en gran parte del gasto del fluido y el gradiente geotérmico. (Xianbiao Bu, 2012)

Weng Long Cheng, et al., presentó en su publicación “*Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells*” un modelo basado en la transferencia transitoria de calor de la formación “El resultado muestra que la temperatura de salida del fluido que sale del pozo de recuperación disminuye gradualmente a medida que aumenta el tiempo de funcionamiento del sistema y finalmente se acerca a la estabilidad. El tiempo de estabilización del sistema puede acortarse ya sea por el aumento de la conductividad térmica de la formación o la disminución de la velocidad de entrada del fluido que ingresa al pozo de



inyección, pero no está significativamente influenciado por la capacidad calorífica de la formación.” (Wen-Long Cheng, 2013)

Por otro lado, Templeton, J. D., et al., se enfocaron en crear un modelo de transferencia de calor confiable para determinar el rendimiento de un intercambiador de calor de doble tubería instalado en un pozo de petróleo abandonado, “Un modelo eficiente y confiable que describe la transferencia de calor para un intercambiador de calor de doble tubo adaptado a un pozo de petróleo abandonado ha sido demostrado”. En este modelo se utiliza una temperatura constante con el fin de vislumbrar los efectos del aislamiento en el revestimiento del pozo, la temperatura del fluido de entrada, la tasa de flujo másico del fluido, la conductividad térmica de la masa rocosa y el agua subterránea vertical. (J.D. Templeton, 2014).

En el sur de Irán un estudio realizado a dos pozos (Az y DQ) en el campo petrolero de Ahwaz, en donde se simuló la transferencia de calor entre el fluido inyectado en el pozo y la roca caliente circundante, y la geometría del revestimiento del pozo y un gradiente térmico exacto para dos pozos petroleros abandonados fueron considerados. Se reveló que, además del gradiente térmico y la tasa de flujo másico de entrada, la geometría del revestimiento del pozo y el tamaño de las tuberías de inyección y extracción eran esenciales para la tasa de extracción de calor de salida. (Younes Noorollahia, 2015)

En estudios más recientes se puede observar un mayor avance en cuanto al desarrollo de estos procesos. En 2019 un estudio se realizó para evaluar la mejora de la transferencia de calor de un nuevo diseño de curvatura del fondo de pozo instalado dentro del pozo utilizando un enfoque de dinámica de fluidos computacional. “Se evaluaron varios diseños de curvatura del fondo del pozo, junto con los efectos de la temperatura de entrada del fluido de trabajo y el caudal. Para la optimización, se adoptó el método estadístico de Taguchi para determinar la combinación óptima de parámetros y sus interacciones.” (Cheng S. W., 2019)

Esta discreta recopilación de fuentes permite observar la evolución en los proyectos de adecuación de pozos petroleros abandonados o activos para la explotación de energía geotérmica, así como los mencionados existen otros más que han demostrado la factibilidad de este proceso y los beneficios económicos que traen a la industria geotérmica, “Por lo tanto, si el AOGW se puede adaptar a un sistema geotérmico para extraer energía térmica, no solo





el riesgo ambiental se puede reducir de manera efectiva, sino además, las utilidades geotérmicas serán más baratas sin costos elevados de perforación.” (Yong-Le Nian, 2018)

3.2.1 Principales factores que intervienen en el proceso de recuperación del calor geotérmico y sus usos

Basados en la revisión a nivel mundial de la aplicación dada en pozos petroleros abandonados se pueden identificar los principales factores influyentes en la explotación geotérmica de estos campos.

3.2.2 Gradiente geotérmico.

Quizas uno de los factores más importantes en la producción de energía geotérmica puesto que es claro que entre mayor sea éste la probabilidad de encontrar un fluido a altas temperaturas será igualmente alta. Aquí la importancia de enfatizar áreas con altos gradientes y grandes profundidades para la recuperación de calor geotérmico.

3.2.3 Tipo de fluido de trabajo.

Estudios revelan que existe una gran importancia en la buena elección del fluido de trabajo, por esto la investigación en la influencia de los fluidos de trabajo en la generación de poder es importante. (Saleh B, 2007)

Está demostrado que un fluido orgánico como fluido de trabajo es más eficiente en la generación de energía eléctrica a partir de pozos geotérmicos de media y baja entalpia usado en ciclos orgánicos Rankine ORC. (Saleh B, 2007)

Una comparación entre agua y aceite realizada por Alimonti 2016 muestra que en términos de flujo de calor destaca valores más bajos para aceite diatérmico que para el agua. Figura 3.5. Este comportamiento se debe al flujo de calor que es directamente proporcional al valor de la capacidad calorífica. (C. Alimonti, 2016)





3.2.4 Temperatura del fluido inyectado y ritmo de inyección.

Tanto la temperatura como el ritmo de flujo a través del pozo son dos factores para considerar en este proceso, puesto que se demostró que a mayor temperatura del fluido inyectado la temperatura a la que sale el fluido será mayor Figuras 3.4 y 3.5. Por otro lado, al aumentar el flujo del fluido el intercambio de calor entre éste y el medio no es eficiente puesto que el agua no tiene el suficiente tiempo para adquirir energía, sin embargo, a flujos bajos el fluido se enfría a lo largo de la tubería y hay mayores pérdidas de presión dando como resultado bajos rendimientos energéticos en la cabeza del pozo. (Kujawa, 2006)

Por esta razón es importante hacer una elección balanceada entre la temperatura de inyección del fluido y el ritmo de inyección.

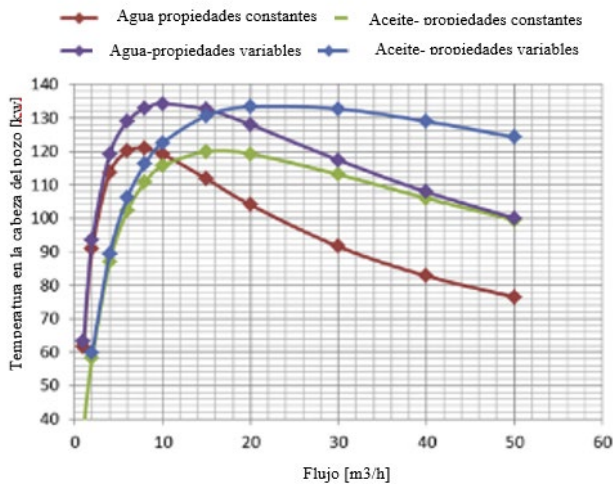


Figura 3.4. Temperatura en cabeza del pozo vs flujo másico (C. Alimonti, 2016)

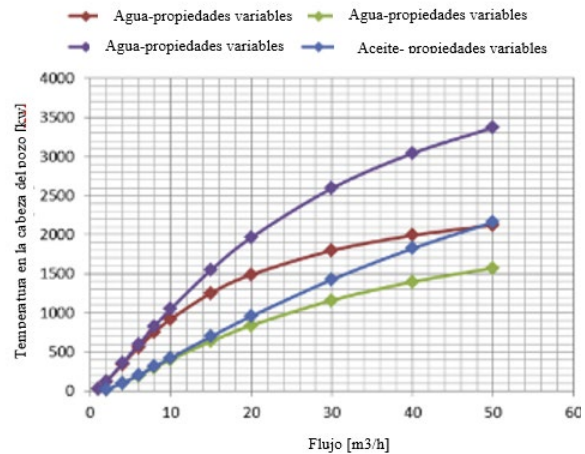


Figura 3.5. Flujo de calor vs flujo másico. (C. Alimonti, 2016)

3.2.5 Influencia del aislamiento

El aislamiento ayuda a reducir las pérdidas de calor generadas en un intercambiador de fondo, en la mayoría de los casos se usa otra tubería adicional para así tener un vacío de aire entre la tubería donde se encuentra el flujo y las paredes del pozo. En el caso de pozos profundos se suele aislar la parte superior en las tuberías de revestimiento para evitar que el calor





transportado del fondo se disipe en las partes más frías cercanas a la superficie. Es común aislar las tuberías hasta el punto en el que la temperatura del pozo es equivalente con la del fluido.

3.3 Características técnicas de los proyectos

Alrededor del mundo existen yacimientos con distintas características y propiedades, aun así, es posible identificar ciertas peculiaridades necesarias para aprovechar el calor geotérmico. Ya algunas investigaciones se han realizado para evaluar el potencial geotérmico de campos petroleros abandonados o explotación geotérmica simultánea con hidrocarburos. (Xiaolei Liu, 2018) (Prol-ledesma, 2020), (Claudio Alimonti E. S., 2021)

Mediante estos medios es posible conjuntar criterios físicos intrínsecos a los campos que sirvan de base para la selección y evaluación de prospectos futuros hablando de yacimientos petroleros abandonados o en proceso de agotamiento.

Liu X., et al., proponen inicialmente dos tipos de yacimientos donde la energía geotérmica de baja temperatura podría ser recuperada:

1) Yacimientos con agua coproducida naturalmente:

Se refiere a aquellos yacimientos que siguen activos en los cuales el agua producida es separa de los hidrocarburos y luego reinyectada al yacimiento o descargada por otros medios (depende del sistema de tratamiento de agua), sin embargo, es posible generar energía eléctrica a partir de esta agua producida.

2) Recuperación de agua previamente utilizada en procesos de recuperación térmica de aceites pesados.

Se refiere a aquellos yacimientos que posterior a la aplicación de este proceso de recuperación mejorada se abandonan una vez alcanzado su corte económico, dejando así energía almacenada en forma de calor que podría ser aprovechada recirculándola a superficie.

El gradiente geotérmico, porosidad, permeabilidad, corte de agua y profundidad son parámetros claves en la evaluación del potencial geotérmico de campos maduros. Bajo estos supuestos se han identificado campos de distintas partes del mundo con potencial geotérmico. (Xiaolei Liu, 2018) (Prol-ledesma, 2020) (Claudio Alimonti E. S., 2021)





Distintos estudios se han enfocado en yacimientos de areniscas debido a la porosidad presentada por este tipo de litologías, Barbacki P.(2000), analizó el campo *Grobla field* con 27 pozos productores de petróleo en areniscas del Jurásico y el Cretácico, con porosidad de 20-30%, y temperatura de los fluidos de 40 °C a una profundidad de 800 m, un campo donde la invasión de agua generó el cierre de muchos pozos.

En Francia como parte del proyecto Meet se realizó una prueba piloto en el campo *Vermilion* donde se encuentran más de 40 pozos con potencial de ser utilizados debido a su temperatura superior a los 70 °C y flujo de fluido de más de 10 m³/h. (Jorquera C., piensa en geotermia, 2019)

En la *Reserva Naval de Petróleo (EUA)* debido a los bajos costos y a la declinación en la producción de aceite en 2007 se decidió emplear el pozo NPR-3 como demostración para la recuperación de energía geotérmica de baja entalpía. De acuerdo con datos del Departamento de Energía de los Estados Unidos Americanos (DOE), NPR-3 es un yacimiento con una temperatura promedio de 110 °C y un gradiente geotérmico de 2.5 °C/100 m. El aceite es coproducido con grandes volúmenes de agua caliente con temperaturas de 80-90 °C. (Milliken, 2007)

Otro campo de estudio es el operado por China National Petroleum Corporation (CNPC), el cual se encuentra al norte de China. Durante años fue el tercer campo con mayor producción en el país, pero después de 30 años de explotación la producción ha disminuido de 700 m³/día hasta 150 m³/día. La temperatura actual del yacimiento se encuentra por los 120 °C con un gradiente geotérmico de 3.5 °C/100m. Como resultado del elevado corte de agua (>97%) y la declinación de la producción de hidrocarburos se consideró que el desarrollo del campo estaba concluido. (Gong B, 2011) (Xin S, 2012)

En los Estados Unidos a lo largo de la costa del golfo se identifican campos con características similares a las ya mencionadas, es decir campos con invasión de agua en la zona de aceite, profundidades entre los 3500-5000 m importantes temperaturas en el yacimiento y la cabeza del pozo. (McKenna JR, 2005) La misma situación presenta en campos en operación en los Angeles, USA, con profundidades de 1800-2500 m y temperaturas de yacimiento de hasta 143 °C (Bennett KP, 2012), e incluso en campos





abandonados en USA, Indonesia y Venezuela con temperaturas mayores a los 120 °C (Limpasurat A, 2010)

En la Tabla 4 se presenta un resumen general de los campos mencionados, realizada en el estudio de Liu 2018, “*A systematic study of harnessing low-temperature geothermal energy from oil and gas reservoirs*”.

Campo	Ubicación	Wyoming USA	Hebei, China	Costa del Golfo USA	USA, Indonesia, Venezuela	California, USA	Costa del Golfo, USA
	Tipo de Hidrocarburo	Aceite	Aceite	Aceite	Aceite pesado	Aceite	Gas
	Estado actual	Maduro	Maduro	Operando	Abandonado	Operando	Abandonado
Yacimiento	Corte de agua	-	Alto	Alto	-	Alto	Alto
	Temperatura [°C]	-110	120	120-200	130	68-143	-
	Temperatura de entrada [°C]	77	110	>150	72	80	138
Pozo	Profundidad [m]	-1524	-	3500-5000	472	1800-2500	-
	Corte de agua [%]	-	98	95-99	-	92-98	-
	Gradiente geotérmico, °C/100m	2.5	3.5	1.2-4.25	4	3.6	-
Planta de poder	Temperatura de salida [°C]	8 - 77	85-90	-	21	55	21
	Gasto [m3/d]	1749-7949	2880	>5453	40	>3715	1252
	Poder instalado [KW]	250	400	-	-	-	-
	Generación de poder [MWH]	1918	310	-	-	-	-
	Potencial de generación de poder [MW]	-	-	1000-5000	0.014	7.4	0.35
	Tipo de planta	Ciclo binario	Ciclo binario	Ciclo binario	Ciclo binario	Ciclo binario	Ciclo binario

Tabla 3.1. Resumen de campos de petróleo y gas con potencial de recuperación térmica. X. Liu et al. / Energy 142 (2018).

Existen otros casos recientes donde la información de los campos resulta escasa como es el caso de una evaluación del potencial geotérmico en Italia, donde se presenta la visión de dicho potencial almacenado en campos petroleros en decaimiento, a través de una aproximación del potencial técnico haciendo uso de los datos disponibles. (Claudio Alimonti E. S., 2021)

Por la escasez de datos de los campos estudiados Alimonti E. calculó las temperaturas de los yacimientos usando como referencia las profundidades conocidas.

Campo	Profundidad	Área	Densidad de la roca		Calor específico de la roca	Temperatura del yacimiento
	m		km ²	Promedio [Kg/m ³]	Rango [Kg/m ³]	Promedio [J/KGK]
Villafortuna-Trecate	5700-6300	34.74	2500	2400-2760	816	160
Gela	3000-3328	38.88	2450	2040-2850	729	86.6
Dosso Angeli	2900-3800	8.51	2100	1600-2680	829	70
Val d'Agri	2000	36.78	2550	2400-2760	816	65
Gagliano	1650-2150	48.51	2550	2500-2600	821	88.5

Tabla 3.2. Parámetros asumidos. (Claudio Alimonti E. S., 2021)





Campo	HIP	Hr	TP	Annual TP
	PJ	PJ	MW	MW
Villafortuna-Trecate	814.8	724.3	765.4	25.5
Gela	351	265.4	280.7	9.4
Dosso Angeli	5.8	4.8	4.1	0.1
Val d'Agri	323.8	202.4	213.9	7.4
Gagliano	110	84	88.8	3

Tabla 3.3. Evaluación del potencial geotérmico. (Claudio Alimonti E. S., 2021)

En Alberta Canadá en búsqueda de crear trabajos para el sector petrolero y aprovechar algunos de los 78,000 pozos suspendidos se han realizado análisis de yacimientos con características prometedoras para aprovechar el calor geotérmico, un estudio realizado en dos acuíferos del Devónico en Alberta Canadá indican buenas condiciones del yacimiento con respecto a la utilización geotérmica con una porosidad promedio del yacimiento de alrededor del 8%, una permeabilidad promedio del yacimiento entre 10-12 y 10-15 m² y conductividades térmicas relativamente altas que varían de 3 a 5 W/mK. (Leandra M. Weydt, 2018)

De igual forma la Asociación Canadiense de Geotermia (CANGea) reportó en el 2016 que un estimado de 60,000 pozos presentan temperaturas lo suficientemente altas (>120 °C) para calefacción de hogares o el cultivo de productos.

En la tabla 3.4 se muestra otro resumen de pozos en diferentes partes del mundo que fueron modificados para instalar un intercambiador de fondo para aprovechar el calor en el fondo de cada uno de estos, como se puede observar en la tabla la variedad en cuanto a su profundidad, su temperatura y sus gradientes es muy amplia, los datos con asterisco son valores estimados con base en la temperatura ya conocida del campo.





Campo	Profundidad [m]	Temperatura [°C]	Gradiente [°C/km]	Referencia
Villafortuna Trecate (Italia)	6000	160	28 *	Alimonti C. y Soldo E. 2016
Caso supuesto	4000	180	45	Xianbia Bu, et al. 2012
Santa Clara (California USA)	2000	116	58	Caulk R., et al. 2017
Monterrey (California USA)	2900	116	40	Caulk R., et al. 2017
Santa Barbara (California USA)	3900	237	49-73	Caulk R., et al. 2017
Kern (California USA)	6600	238	20-36	Caulk R., et al. 2017
Fresno (California USA)	4900	122	25	Caulk R., et al. 2017
Los Angeles	4250	233	27-55	Caulk R., et al. 2017
Ventura (California USA)	5000	175	22-35	Caulk R., et al. 2017
Texas, USA	3000	140	46*	Davis A., et al 2009
Alberta, Canada	3000	125	41.66*	Steven J., et al 2015
Sur de iran	4100	150	36.5-36.3	Noorollahi J., et al, 2015
Reino Unido	4200	130	31	N. M. Wight and N. S. Bennett, 2015.

Tabla 3.4. Datos de Profundidad, temperatura y gradiente de distintos proyectos de AOGW alrededor del mundo.

De manera más puntual varios criterios se identifican para la determinación de campos de aceite y gas ideales para la explotación geotérmica: (Prol-ledesma, 2020) (Barbacki, 2000)

- Gradiente geotérmico
- Flujo de calor
- Porosidad
- Profundidad
- Gastos de producción constantes
- Condiciones adecuadas para la reinyección del agua al yacimiento
- Usuarios potenciales de esta energía cercanos a la zona.
- Condiciones de explotación (tipos de fluidos, condiciones del agua, ciclo de producción, fluctuación de presiones)





- Parámetros geotérmicos (gradiente de temperatura, presión del yacimiento, posibilidad de producción)
- Condiciones hidrológicas (examen y descripción de la zona de infiltración y el área de afloramiento de los horizontes del yacimiento, dirección de la migración de fluidos, química de fluidos)

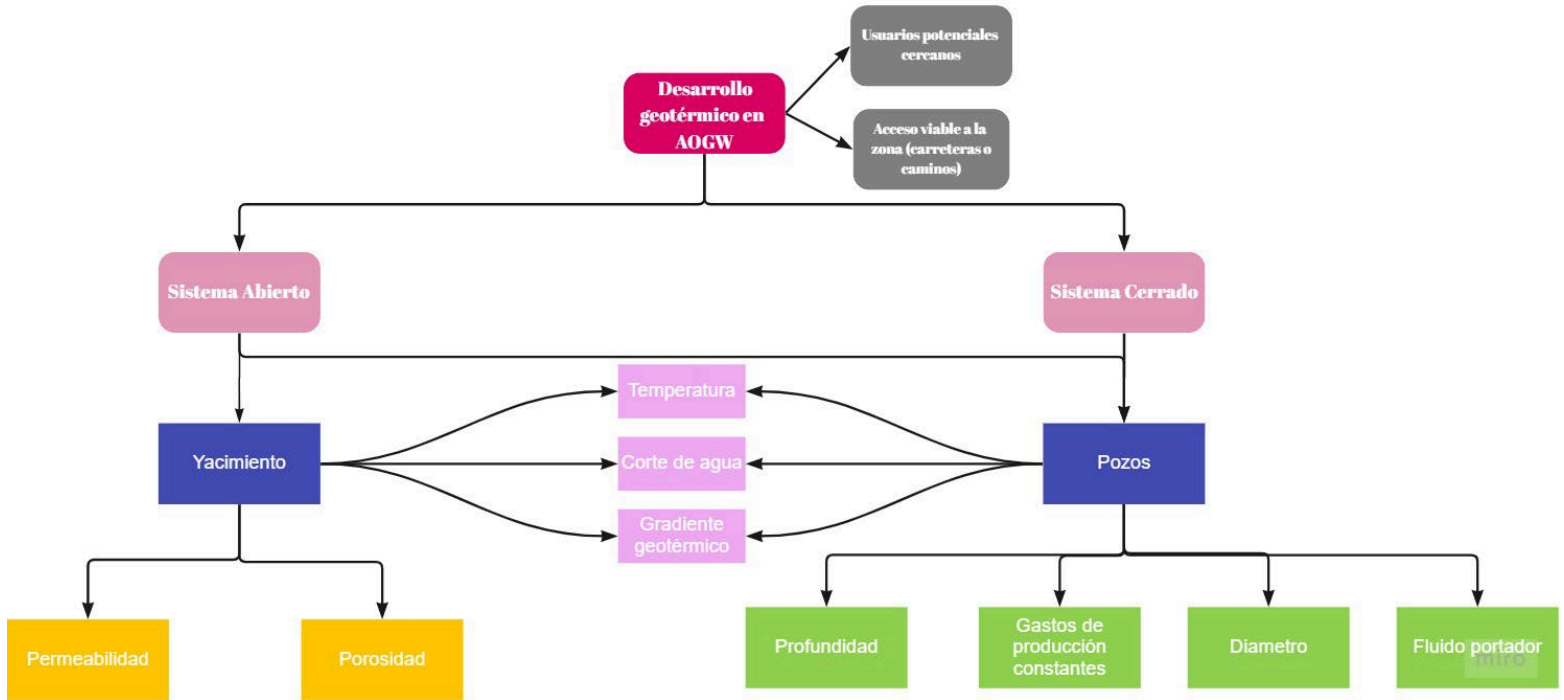


Figura 3.6. Características para el desarrollo geotérmico en AOGW. Elaboración propia

En la figura 3.6 se muestra los aspectos o características a tomar en consideración para el desarrollo geotérmico en AOGW este mapa muestra que ciertos términos como la permeabilidad y la porosidad son propiedades que no son necesariamente vitales cuando el proceso por el cual se va a extraer el calor es mediante un sistema cerrado, sin embargo es importante considerar aspectos como la profundidad, el gasto de producción, el diámetro de las tuberías y el fluido de trabajo (ya sea agua o algún otro) en ambos sistemas, cerrado y abierto, ya que en el sistema cerrado definir estas características es igual de necesario que en un sistema abierto puesto que al final se utilizan pozos para inyectar y extraer el fluido portador de calor.





3.4 Características legales del país donde se desarrolla

Anteriormente se presentó la extensa cantidad de proyectos que existen alrededor del mundo referentes al aprovechamiento de pozos petroleros para uso geotérmico, dentro de estos ejemplos destacan algunos países en el desarrollo de esta industria, como son; Estados Unidos, Canadá, Italia, China y Francia. Definido esto, resulta de interés identificar las características en materia legal en el que se encuentran estos países, con el fin de comparar dichas regulaciones energéticas con el régimen legal presente en México.

3.4.1 Estados Unidos de América

En el caso de USA cada estado se encarga de regular las actividades de perforación y producción de petróleo y cada uno cuenta con leyes a nivel estatal y regulaciones que aplican en cada caso en particular. Es necesario conocer los requerimientos de cada estado si se desea comenzar operaciones en uno de estos. A nivel federal las principales consideraciones son, salvaguardar el agua, la calidad del aire y la seguridad del trabajador, al igual que la exploración y producción en tierras nativas americanas, tierras federales, y plataforma continental exterior. Respecto a la exploración de aceite y gas existen un amplio rango de regulaciones, algunas de estas regulaciones incluyen, regulaciones ambientales, regulaciones salariales y de empleo, y regulaciones corporativas. (Speed-Bost, 2021)

La Comisión General Reguladora de Energía (FERC) es el órgano principal que regula a las compañías petroleras, no obstante, existen varias entidades encargadas de aspectos específicos de la industria petrolera; (Library of Congress , s.f.)

- **Página de petróleo y gas de la Oficina de Administración de Tierras (BLM):** Regula las tierras terrestres federales. Su sitio web sobre el programa de petróleo y gas del gobierno contiene información de venta de arrendamiento, formularios, estadísticas y pautas de cumplimiento.
- **Oficina de Gestión de la Energía Oceánica (BOEM):** Formalmente el Servicio de Gestión de Minerales junto con BSEE, BOEM es responsable de proporcionar arrendamientos para explorar tierras federales en alta





mar. Está dividido en cuatro regiones: Alaska, Atlántico, Golfo de México y Pacífico. Su sitio web oficial contiene regulaciones, estatutos que rigen y datos GIS.

- **Oficina de Gestión de la Energía Oceánica (BOEM):**

Responsable de la administración y desarrollo de los recursos del litoral del país, incluyendo planes de exploración y desarrollo de recursos como petróleo y gas.

- **Agencia de Protección Ambiental (EPA):**

La EPA es responsable de la emisión de regulaciones, incluidas las normas de azufre.

- **Comisión Federal de Regulación de Energía (FERC):**

El sitio web oficial de FERC, regula las tarifas de los oleoductos para fomentar el uso máximo y regula las prácticas de transporte interestatal de las empresas de petróleo y gas.

- **Administración de seguridad de tuberías y materiales peligrosos (PHMSA):**

Al igual que su nombre lo indica, PHMSA evalúa la seguridad y el rendimiento de las tuberías. Su sitio web incluye datos sobre incidentes, información sobre regulaciones y permisos, e investigación sobre la seguridad de las tuberías. La oficina es una parte organizativa del Departamento de Transporte.

- **Comisión de Bolsa y Valores (SEC):**

La SEC garantiza el cumplimiento financiero y organizativo de las tenencias de servicios públicos interestatales, así como de las empresas que cotizan en bolsa en la industria del petróleo y el gas.

- **Departamento de Energía de EE. UU:**

El Departamento de Energía gestiona la infraestructura nuclear de Estados Unidos y administra la política energética del país. El Departamento de Energía también financia la investigación científica en el campo. Es la agencia matriz de la Agencia de Información Energética y la Oficina de Energía Fósil.

- **Guardia Costera de los Estados Unidos:**

Si bien no es una agencia reguladora, la Guardia Costera de los EE. UU. Es responsable de responder a los derrames de petróleo en alta mar.

En Estados Unidos la mayoría de las leyes y regulaciones facilitan la transición energética abordando problemas ambientales que vienen con el uso de los combustibles fósiles. Los cumplimientos basados en mantener la limpieza del aire y del agua comúnmente terminan en





el desarrollo de energías renovables, siendo así que el 2019 fue el cuarto año consecutivo que el consumo total de energías renovables creció al punto de alcanzar un nuevo record, 11.5 cuatrillones de BTU. (Speed-Bost, 2021)

En cuanto al desarrollo de energía geotérmica el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) ha anunciado que aportará hasta 8,4 millones de dólares para financiar cuatro proyectos de energía geotérmica. Los proyectos consistirán en la conversión de varios pozos de petróleo y gas abandonados en pozos geotérmicos. (Oilprice, 2022)

3.4.2 *Canadá*

Gobiernos federales y estatales comparten jurisdicción sobre la política energética canadiense, al igual que el marco legal y regulatorio en materia de exploración de las reservas petroleras canadienses, esto implica que no hay una política y organismo independiente que gobierne el desarrollo de los recursos petroleros en Canadá. La propiedad de derechos en recursos por parte del gobierno federal en Canadá es mucho menor en comparación con los que tienen los gobiernos provincianos, estos derechos son gobernados por Canadian Petroleum Resources Act y Canada Oil and Gas Operations Act. (Christine Milliken, 2021)

El Regulador de Energía Canadiense (CER) formalmente Junta Nacional de Energía es la agencia federal que maneja la mayoría de los aspectos internacionales e interprovinciales de las industrias de servicios públicos de petróleo, gas y electricidad, como tuberías, desarrollo y comercio de energía, del interés público canadiense. (Christine Milliken, 2021)

En Canadá las empresas obtienen el derecho a explorar, perforar y producir petróleo principalmente por los gobiernos provincianos.

Como ya se mencionó los gobiernos estatales tienen jurisdicción total sobre sus tierras y son responsables de regular su desarrollo, algunos de los reguladores por provincia o territorio se enlistan a continuación. (Oil and Gas info, s.f.)

- ✓ Alberta Energy Regulator
- ✓ British Columbia Oil and Gas Commission
- ✓ New Brunswick Natural Gas
- ✓ Newfoundland and Labrador Department of Natural Resources
- ✓ Northwest Territories Office of the Regulator of Oil and Gas Operations (OROGO)





- ✓ Nova Scotia Department of Energy
- ✓ Ontario Ministry of Natural Resources and Forestry
- ✓ Petroleum Branch of Manitoba Agriculture and Resource Development
- ✓ Prince Edward Island Department of Finance, Energy and Municipal Affairs
- ✓ Québec Natural Resources
- ✓ Saskatchewan Energy and Resources
- ✓ Yukon Department of Energy, Mines and Resources

Respecto a la transición energética y la descarbonización existen una serie de regulaciones ambientales provinciales en vigor para regular las emisiones al aire, el uso del agua y la gestión de relaves de arenas petroleras. Además, se les obliga a las compañías participantes a monitorear los impactos en la calidad del aire y uso de agua. Con base en el acuerdo de Paris, el gobierno de Canadá se ha comprometido a reducir en un 30% la generación de gases de invernadero para el 2030. Esfuerzos en común por parte de las empresas participantes para reducir las emisiones de gases de invernadero es invertir en el desarrollo y despliegue de tecnología, así como optimizar activos actuales con el fin de reducir emisiones. (Christine Milliken, 2021)

En aspectos geotérmicos Canadá es un país que ha tenido grandes avances en la industria en los últimos años siendo así que diversos grupos del sector geotérmico y petrolero han establecido una nueva alianza para el impulso de la geotermia en Canadá, esta iniciativa busca el desarrollo de esta fuente de generación en el oeste del país, donde tiene más potencial. En una zona tradicionalmente dedicada a la explotación de pozos petrolíferos y de gas natural, echo que además de complementar el desarrollo energético del país ayudará a generar empleos para los trabajadores desplazados de los sectores de petróleo y gas. (Benito, 2020)

3.4.3 Italia

Las reservas de hidrocarburos son propiedad del estado, su exploración y su explotación son del interés público y son llevadas a cabo por empresas bajo un régimen de concesión legal.





La institución llamada MiSE juega uno de los roles principales, ya que es la encargada de evaluar los proyectos desde una perspectiva técnica y económica, emite los permisos relevantes, al mismo tiempo este órgano coordina sus actividades con el ministerio de protección ambiental de mar y tierra (MATTM) y las regiones para evaluar los proyectos de extracción mar afuera y en tierra. (Fiorella Alvino, 2021)

Los derechos mineros se componen de permisos de prospección y exploración, licencias de producción y concesiones exclusivas.

Los proyectos son seleccionados por la MiSe, una vez que tuvo la opinión del organismo consultivo, la Comisión para Hidrocarburos y Mineral Resources (CIRM)

Existen permisos para la exploración y licencias para la producción. Las licencias son otorgadas a los titulares de permisos que han encontrado hidrocarburos y que han probado que cuentan con la tecnología y el financiamiento adecuado para el desarrollo del yacimiento. Hay un decreto directivo que otorga la licencia, en el cual la MiSe es la responsable de su emisión, esta contiene todas las regulaciones y restricciones emitidas por los organismos que han examinado el proyecto durante todo el proceso administrativo, siendo así el decreto directivo el último paso del proceso, los organismos incluidos son; MATMM o la región para aspectos de compatibilidad ambiental, las provincias, y los municipios para la construcción de plantas y pozos. (Fiorella Alvino, 2021)

En cuanto a energías renovables Italia al igual que otros países es parte del acuerdo de París donde buscan disminuir las emisiones de CO₂ y aumentar el uso de energías renovables para el 2030, de acuerdo con su gobierno, las acciones tomadas disminuirán un 56% las emisiones de carbono en el sector de la industria pesada y un 35% en industrias terciarias y transporte. (Fiorella Alvino, 2021)

Italia fue el primer país en el desarrollo de energía geotérmica sin embargo durante un tiempo se quedó varada la industria debido a la falta de incentivos y resistencia de los ciudadanos a permitir la colocación de plantas geotérmicas debido a la desinformación (Jorquera c. , Piensa en Geotermia , 2018), sin embargo en los últimos años el cambio en la regulación y el decreto de la llamada Fer2 el gobierno otorgó 105 millones de dólares por año para el desarrollo geotérmico. (Jorquera c. , Piensa en Geotermia, 2021)





3.4.4 Francia

En Francia el Departamento de Energía y Clima (DGEC en francés) del Ministerio de Transición Ecológica, es el encargado del desarrollo e implementación de política energética, productos energéticos, y la pelea en contra del calentamiento global.

El Buro de Exploración y Producción de Hidrocarburos (BEPH en francés) es el responsable del manejo de los hidrocarburos en Francia, lo cual incluye la adquisición de licencias de exploración y producción de aceite y gas y el monitoreo de actividades relacionadas, también se encarga de hacer públicos todos los datos correspondientes a la exploración y producción en Francia, tales como derechos minerales, datos geológicos, datos geofísicos, datos de perforación y producción. (Thierry Lauriol, 2021)

La Oficina de Investigaciones Geológicas y Mineras (BRGM en francés) es una institución pública encargada del manejo de los riesgos en fuentes superficiales y subsuperficiales también se encarga del manejo los datos sísmicos.

La Comisión Reguladora de Energía (ERC) supervisa el funcionamiento adecuado de la electricidad interna y los mercados de gas, así como el comercio de gas y electricidad en las fronteras. En Francia están prohibidos los permisos para nuevas exploraciones y la exploración como tal estará prohibida para el 2040. (Thierry Lauriol, 2021)

Los permisos y concesiones exclusivas de investigación existentes están sujetos a un régimen específico previsto en el Código de Nueva Minería. El mismo régimen se aplica para el desarrollo de las reservas petroleras.

Respecto a las concesiones el Código de Nueva Minería menciona que solo el poseedor de un permiso de exploración en vigor puede obtener una concesión, adicionalmente el poseedor del permiso exclusivo de exploración tiene el derecho, en caso de que la solicitud sea hecha antes de que dicho permiso expire, de conceder concesiones sobre los yacimientos encontrados y pueden ser explotados dentro de los parámetros de su permiso durante el período de validez del permiso mencionado. (Thierry Lauriol, 2021)

En Italia se han prohibido nuevos permisos y concesiones para la exploración de hidrocarburos, en cuanto a las concesiones, éstas no serán renovadas más allá del 2040 y las que se encuentren activas serán finalizadas para diciembre del 2039. (Thierry Lauriol, 2021)





Francia ha tomado una medida drástica para apoyar la transición energética la cual como ya se ha mencionado consistió en prohibir la exploración de hidrocarburos y limitar su producción hasta una fecha límite, Francia espera una reducción del 35 % en la emisión de gases invernadero correspondientes al consumo de petróleo con respecto al 2012 y un 19% en el consumo de gas natural. (Thierry Lauriol, 2021)

En aspectos geotérmicos en 2019 Francia estableció una nueva regulación geotérmica, el decreto establece un régimen simplificado para proyectos en una situación geológica conocida y que requiere solo una fase de exploración limitada, y elimina la distinción basada en la temperatura, baja o alta, del recurso. (Jorquera C. , Piensa en Geotermia , 2020)

La Unión Europea también ha realizado el financiamiento del proyecto meet el cual consiste en un proyecto piloto de producción de electricidad geotérmica en pozos petroleros abandonados realizado en 2020 en Vermillion Francia. (Jorquera C. , Piensa en Geotermia, 2020)

3.4.5 Comparación legal

En aspectos legales México cuenta con una serie de regulaciones energéticas que complican el desarrollo de la industria Geotérmica a partir de pozos petroleros, principalmente la dificultad de modificar un pozo abandonado o con potencial geotérmico y esto a causa de que los pozos en su mayoría se encuentran resguardados por PEMEX, y los pocos que no se encuentran en esta situación son parte de contratos temporales con empresas privadas, el problema surge en que actualmente no existe una regulación que permita la extracción de recursos geotérmicos en zonas petroleras o en su caso que los contratos generadas a partir de las licitaciones solo se limitan a la extracción de hidrocarburos y de la misma forma PEMEX tiene como fin el de explorar y explotar únicamente hidrocarburos.

Planteado lo anterior es considerable objetar que la manera correcta de aproximarse a este tipo de recurso como lo es la geotermia en pozos de hidrocarburos sería mediante una modificación en la ley en la cual CFE (encargada de la explotación geotérmica) apoyará o brindara soporte a Pemex en el aprovechamiento del calor natural existente en zonas de hidrocarburos.





Por otro lado es importante mencionar que México a diferencia del régimen legal en materia energética de países como USA y Canadá cuenta con un régimen legal más centralizado que podría limitar hasta cierto punto las decisiones y cambios a favor del desarrollo geotérmico en pozos petroleros, así mismo en otro países Italia que al igual que México tiene una empresa productora de petróleo predominante el gobierno ha buscado impulsar el desarrollo de otras energías por medio de inversiones e incentivos a sus empresas para reducir la producción de CO₂, siendo así es necesario aplicar en México medios por los cuales tanto las empresas productoras del estado (en este caso PEMEX) y las empresas privadas se involucren en el desarrollo de energías limpias.

Por otro lado, cuando se implementó la Reforma Energética se pudo observar una mayor accesibilidad y apertura en campos, yacimientos, pozos y datos referentes a estos por el hecho de que el mercado privado se involucró en el desarrollo de la industria, dicho sistema legal comenzó a tomar similitud a los modelos europeos como es el caso de los países anteriormente descritos, donde existen entes gubernamentales para cada actividad que se involucra en la industria petrolera.

México en contrariedad con la regulación ambiental y el impulso de energías renovables en los otros países donde el uso de pozos petroleros para aplicaciones geotérmicas ha sido un éxito, USA, Canadá, Italia, Francia y China por mencionar algunos, no tiene bien establecida una regulación actual que permita como ya se mencionó el desarrollo de geotermia en pozos petroleros.

En la siguiente tabla se muestra una comparación de como se encuentra regulada la industria petrolera en los países mencionados y en México, así mismo se menciona superficialmente algunos aspectos sobresalientes en cuanto al estado de la industria geotérmica en cada país y el uso de AOGW para esta área.





CAPITULO 3 PROYECTOS GEOTÉRMICOS CON POZOS ABANDONADOS

Physical Evidence	USA	CANADA	ITALIA	FRANCIA	MÉXICO
Política Energética	Departamento del Interior (DOE)	Gobiernos federales y estatales comparten jurisdicción sobre la política energética canadiense	MiSE	Departamento de energía y clima (DGEC)	Secretaría de Energía (SENER)
Administración de recursos	Oficina de Admón. de Energía Oceánica (BOEM)			Buro de Exploración y producción de Hidrocarburos (BEPH)	Comisión Reguladora de Energía (CRE) Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH)
Seguridad Industria	Oficina de Cumplimiento de Salud y Seguridad Industrial (BSEE)	Petroleum Resources Act y Canada Oil and Gas Operations Act	El ministerio de protección ambiental de mar y tierra (MATTM)	La Oficina de Investigaciones Geológicas y Mineras (BRGM)	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA)
Medio Ambiente					
Geotermia	Permisos para exploración tardan hasta 7 años	Ley de desarrollos de recursos geotérmicos (GRD) para un desarrollo responsable.	Se reintegrarán los incentivos al desarrollo de la energía geotérmica y serán parte del Decreto Fer 2	Nueva regulación para la solicitud de licencias, establece una sola fase de exploración y elimina la distinción por temperatura.	(LAERFTE), (LSPEE),(LFD),(LAN) y la Ley Minera
Geotermia en AOGW	Inversión de 8.4 millones en el uso de AOGW para aplicaciones geotérmicas	Grupos del sector geotérmico y petrolero han establecido alianzas para el desarrollo geotérmico.	Existen proyectos recientes en el área pero no hay registro de incentivos o regulaciones al respecto	Proyecto meet financiado por la UE	Investigación académica sin aplicación en la industria

Tabla 3.5. Comparación en materia de regulación de recursos energéticos y desarrollo geotérmico. Elaboración propia





4 ANÁLISIS DE LOS POZOS CON POTENCIAL GEOTÉRMICO EN MÉXICO, CASO DE ESTUDIO

Este capítulo tiene como fin demostrar el potencial geotérmico de México en toda su extensión para después enfocarse en la provincia petrolera de Burgos basado en los estudios previamente realizados en esta zona. El objetivo es identificar de manera cualitativa la cantidad de pozos que se pueden prospectar para algún uso geotérmico, al final del capítulo se estudian 19 pozos con datos reales de temperatura y profundidad para empatar estos valores conocidos con los rangos de temperatura habituales para distintas aplicaciones geotérmicas y demostrar que gran mayoría de estos pozos pueden ser potenciales para el desarrollo de la geotermia en pozos petroleros no productores.

4.1 Potencial Geotérmico en México

México cuenta con abundantes sistemas geotérmicos a lo largo de su territorio, en el año 1959 la Comisión Federal de Energía (CFE) desarrolló el primer campo geotérmico, a partir de entonces y hasta la fecha se han perforado cerca de 230 pozos activos repartidos en sus 4 campos productores; 160 en Cerro Prieto, 40 en Los Azufres; 23 en Los Humeros, 4 en Las Tres Vírgenes, juntos generan un total de 6045 GWh. (Geotermia en México, CeMIEGeo, consultado 2022, CeMIEGeo).

4.1.1. Provincias geotérmicas en México

Si bien los campos desarrollados en México figuran dentro de las zonas con mayor potencial existen extensas áreas dentro del territorio que pueden resultar benéficas para el desarrollo de la Geotermia, ya sea por usos directos o generación eléctrica.

Prol-Ledesma y Morán-Zenteno Clasifican el territorio nacional en 11 zonas geotérmicas basándose en la correlación de medidas de flujo de calor, dicha discretización se realiza a través de los 6 tipos propuestos por Moeck, “*tres tipos convectivos y tres conductores: CV1-tipo magmático dominado por convección; CV2–dominado por convección tipo plutónico; CV3: tipo de dominio extensional dominado por convección; CD1 = tipo intracratónico dominado por conducción; CD2 – dominado por la conducción tipo cinturón orogénico;*





Capítulo 4 Análisis de los pozos con potencial geotérmico en México, caso de estudio

CD3 – tipo conducción dominada por el basamento”, 1 Provincia CV1-MVB (Cinturón Volcánico Mexicano), 2 Provincia CV3-CP (Cerro Prieto), 3 Provincia CV1-GE (Extensión del Golfo), 4 Provincia CV2-SMO (Sierra Madre Occidental), 5 Provincia CV3-RGR (Río Grande Rift), 6 Provincia CV1-CIV (Interplaca volcánica central), 7 Provincia CD2-SMO_r (Sierra Madre Oriental), 8 Provincia CV1-EIV (Interplaca volcánica oriental), 9 Provincia CD2-SMS (Sierra Madre del Sur) y 10 Provincia CV1-SEV (vulcanismo del sureste). (Moeck, 2013)

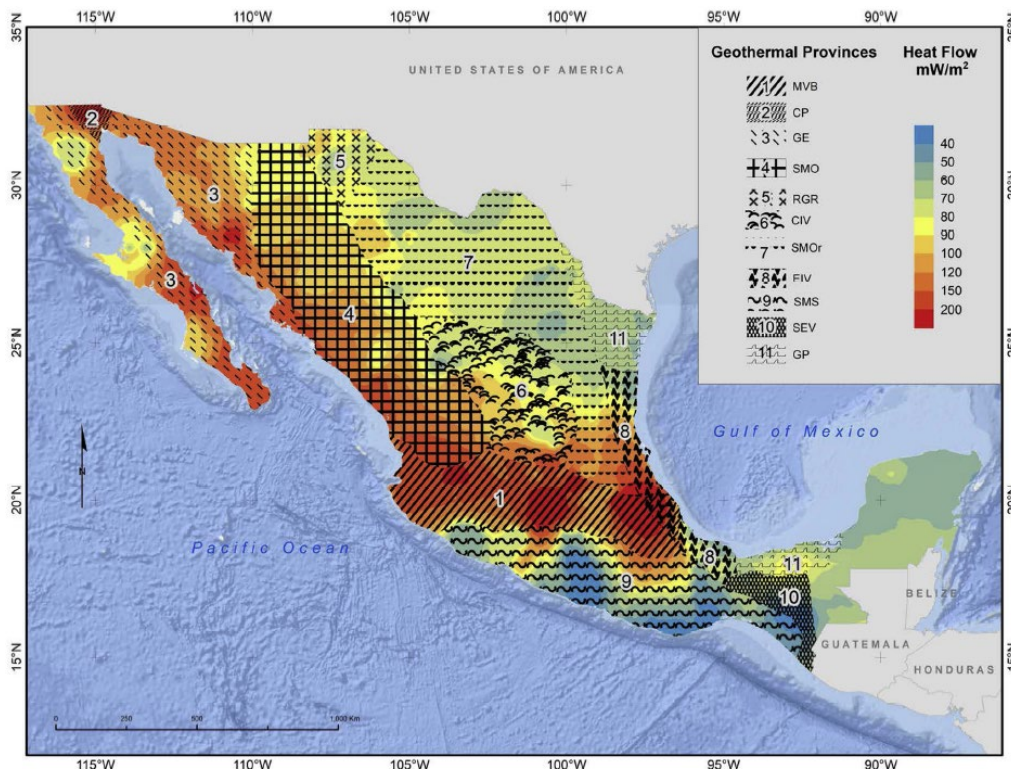


Figura 4.1. Mapa de las provincias geotérmicas en México con la distribución de flujo de calor en fondo. (Rosa María Prol-Ledesmaa, 2019)

Como se puede observar en la imagen existe una onceava provincia que no está definida por Moeck y a la cual Prol-Ledesmaa define como sistema geotérmico geoprezurizado considerada como aquella provincia en la que se encuentran sistemas hidrotermales asociados con depósitos petroleros. “No se han desarrollado aun campos geotérmicos, pero se han reportado pozos con gradientes geotérmicos por arriba de los 70°C/KM”. (Rosa María Prol-Ledesmaa, 2019)





4.2 Pozos petroleros con potencial geotérmico

Basados en el estudio de Prol-Ledesma y Morán Zenteno, 2020, junto con los reportes de Enguiluz Antuña sobre pozos con gradientes geotérmicos de hasta 70°C/Km , se opta por analizar los pozos de hidrocarburos desarrollados en la zona de Burgos al Noreste del territorio mexicano. (Eguiluz-de Antuñano, 2009)

Burgos cuenta con poco más de 8,200 pozos perforados hasta la fecha y destaca por ser una de las zonas con mayor historia en la industria petrolera debido a las altas producciones de gas; además, cuenta con yacimientos de gas y aceites condensados. Adicional a esos recursos de hidrocarburos, la región posee características geológicas, como una amplia capacidad de almacenar fluidos y un alto gradiente geotérmico que se encuentra en un rango de entre 40 y 70°C/km , lo que permite clasificarla como una provincia geotérmica capaz de producir electricidad mediante plantas de ciclo binario. (Mata, Evaluación del potencial geotérmico del Campo Comitas en la Cuenca de Burgos, 2021)

Debido a la escasez de datos de los campos y pozos petroleros, para plantear una estimación de la cantidad de pozos y los posibles usos que se pueden aprovechar a partir de estos se procedió a identificar la cantidad de pozos a diferentes profundidades en la cuenca de Burgos siendo así de los 8,212 pozos registrados por CNH (CNH 2022), se pudo realizar el siguiente gráfico.

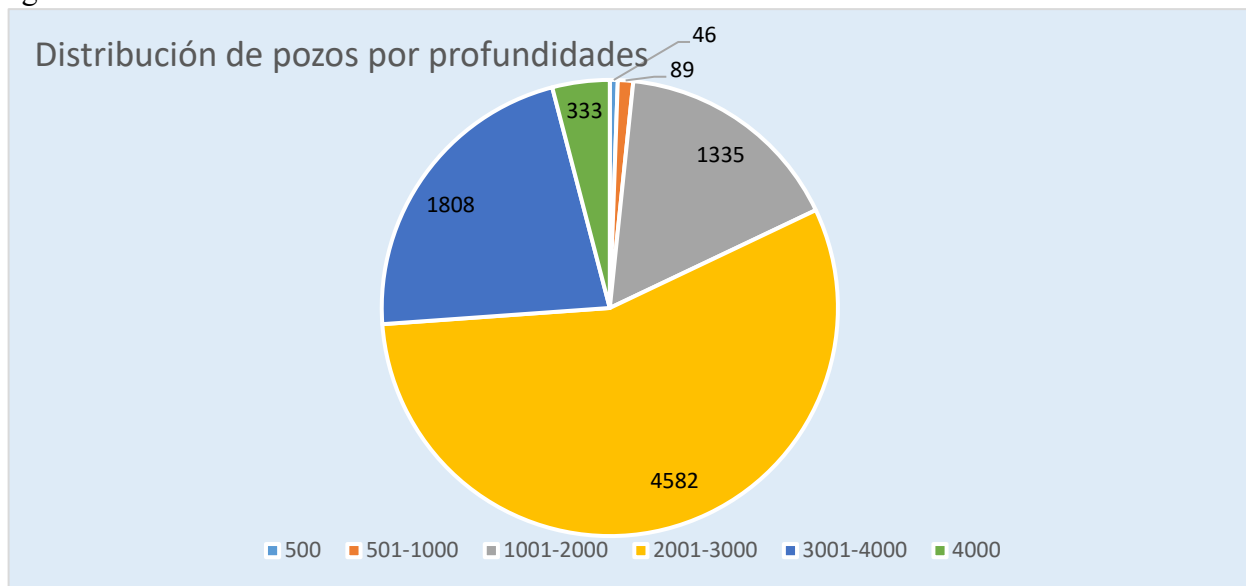


Figura 4.2. distribución de pozos por profundidades en la cuenca de Burgos. CNH 2022.
<https://mapa.hidrocarburos.qob.mx/>





Capítulo 4 Análisis de los pozos con potencial geotérmico en México, caso de estudio

Es posible observar que la cantidad de pozos perforados por encima de los 2000 metros de acuerdo con el gráfico anterior es bastante considerable y basado en la conjetura de que existen gradientes de al menos $40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ sería factible encontrar temperaturas que oscilen entre los 80° y 240°C a nivel de yacimiento.

Se realizó un cálculo basado en los datos generados de flujo de calor realizados por ProLedesma y Morán Zenteno, 2020, para la generación de un mapa de flujo de calor en territorio mexicano, se utilizaron los valores que se encuentran dentro de la provincia de Burgos para determinar un valor aproximado del gradiente geotérmico en la zona (figura 4.3), el cálculo de dicho gradiente se realizó a partir de la relación entre la conductividad térmica, el flujo de calor y el gradiente geotérmico. El valor de conductividad térmica se tomó como 2.5 el cual es el valor promedio de la litología de la corteza.

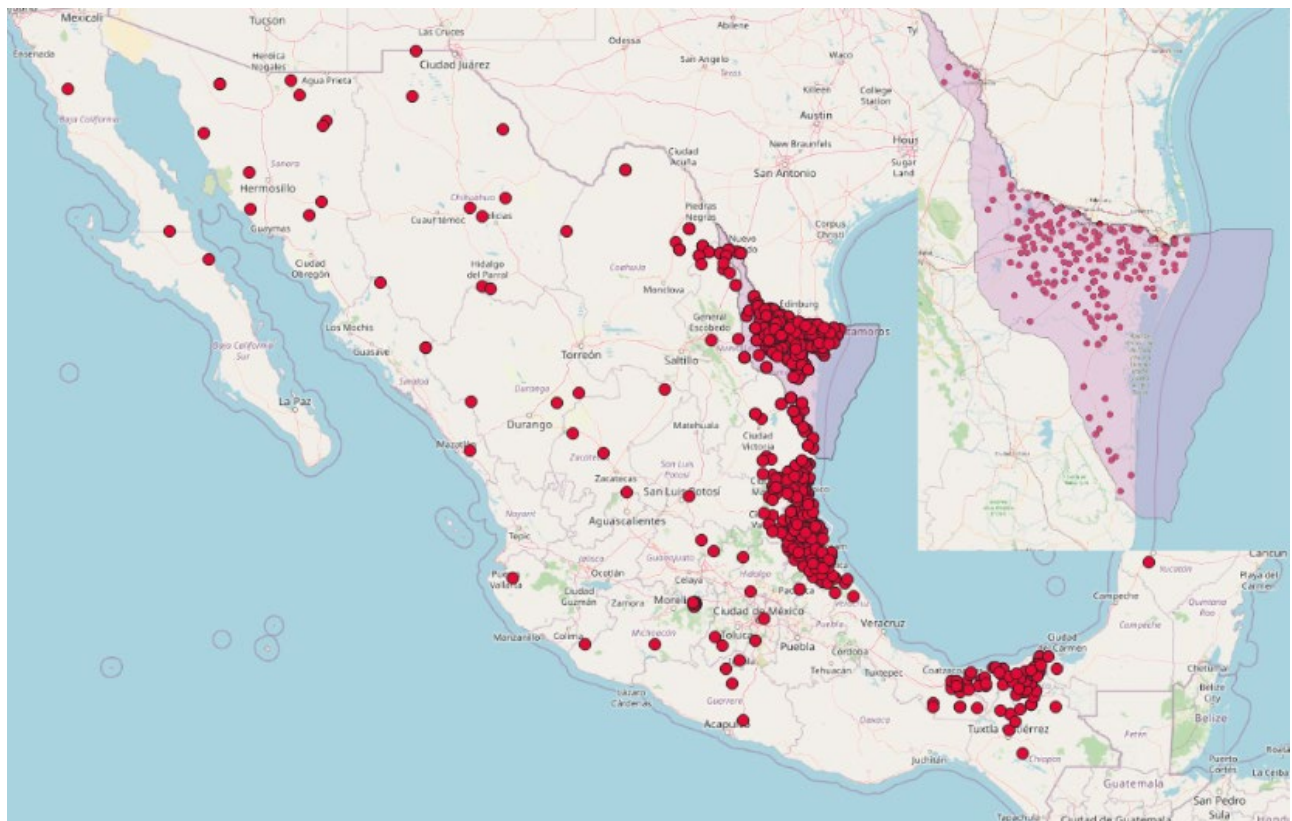


Figura 4.3. Datos de flujo de calor en territorio mexicano y en Burgos. (ProLedesma, 2020)





Capítulo 4 Análisis de los pozos con potencial geotérmico en México, caso de estudio

Se sabe que el calor que emite la Tierra se cuantifica mediante el flujo de calor superficial, que es la cantidad de calor que pierde el planeta por unidad de superficie y tiempo. El flujo de calor superficial se calcula como el producto del gradiente geotérmico y la conductividad térmica del medio por lo que a partir de que se conocía el flujo de calor en la zona y usando el valor ya mencionado de conductividad térmica se tiene que el gradiente geotérmico se puede obtener como el valor resultante del flujo de calor entre la conductividad térmica.

El resultado de dicho cálculo fue un gradiente geotérmico promedio de aproximadamente $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$, este valor estimado, en conjunto con la suposición de gradientes de entre los 40 y $70^{\circ}\text{C}/\text{km}$ se procedió a determinar las temperaturas de fondo de pozo para los casi $8,000$ pozos de Burgos perforados por encima de los 500 m de profundidad. El gráfico 4.4 muestra la distribución de temperaturas de acuerdo con los 3 gradientes supuestos y las empata con el ya conocido diagrama de Lindal con el fin de ubicar la ventana de oportunidades que se pueden aprovechar de cada uno de estos pozos en los usos geotérmicos.



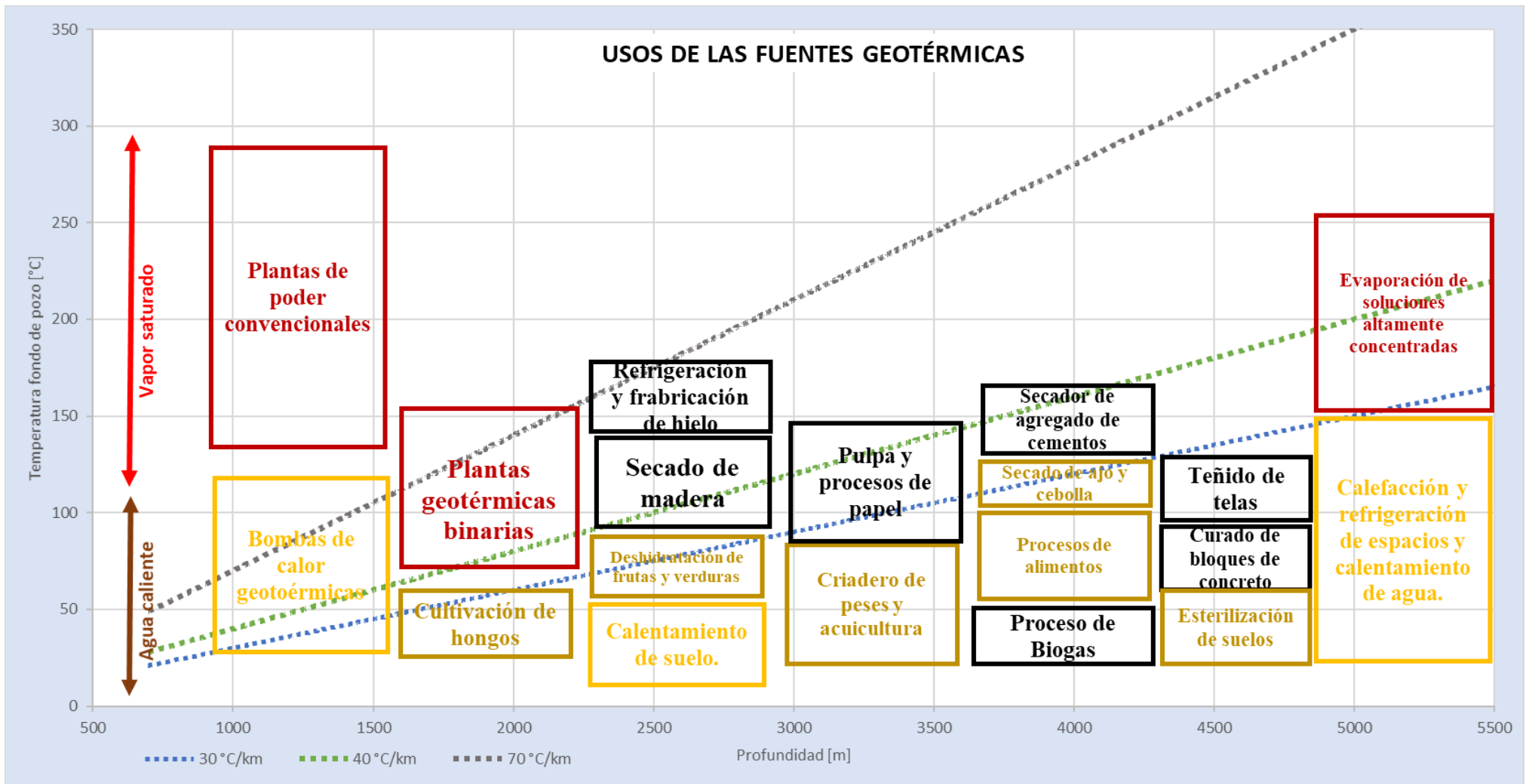


Figura 4.4. Comparación de temperaturas de fondo de pozos supuestas en la zona de Burqos con los rangos en los usos geotérmicos de acuerdo con el diagrama de Lindal.



Capítulo 4 Análisis de los pozos con potencial geotérmico en México, caso de estudio

Como se explicó la figura 4.4 es una estimación de las temperaturas que se pueden encontrar en la zona de Burgos a lo largo de los casi 8000 pozos graficados.

Con el fin de ahondar en datos más precisos se procedió a solicitar datos a la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) de pozos ubicados en los campos de Arcos, Comitas y Velero en la zona de Burgos.

4.3 Campos de estudio

Basado en la investigación realizada previamente por Mata, Irving 2021 sobre el potencial geotérmico del campo Comitas desde una perspectiva de generación de poder eléctrico se decidió incluir este campo para visualizar la capacidad que tiene en las diferentes aplicaciones de la geotermia y compararlo con los otros campos seleccionados (Arcos y Velero) los cuales se encuentran en zonas de fácil acceso lo cual propicia la aplicación de los usos geotérmicos en los pozos de dichos campos. (Barbacki, 2000)

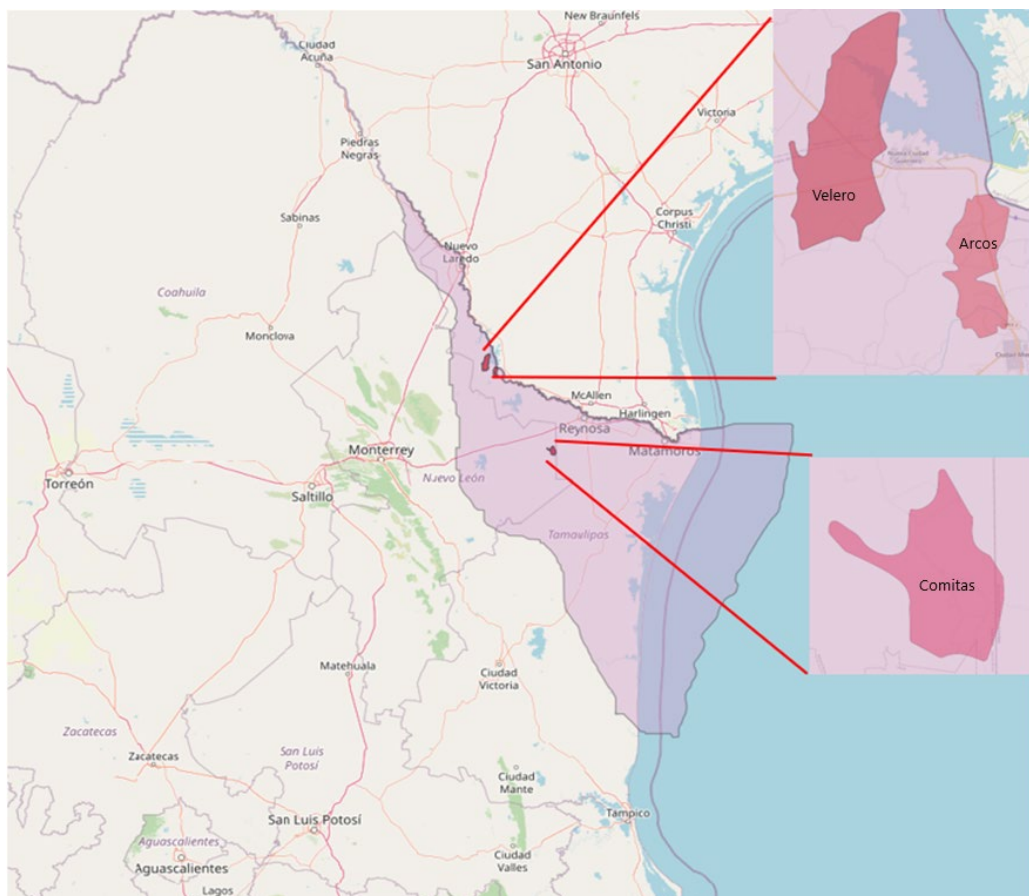


Figura 4.5. Campos seleccionados para el caso de estudio.





La tabla 4.1 muestra la cantidad de pozos que no se encuentran produciendo en los campos de estudio, así como un gradiente geotérmico aproximado basado en los datos adquiridos y el flujo de calor promedio de cada campo.

Campo	Hidrocarburo	Pozos no productores	Profundidad [m]	Flujo de calor [mW/m ²]	Gradiente geotérmico [°C/KM]
Arcos	Gas Seco	93	2710-4339	78-90	30-53
Comitas	Gas seco- Gas condensado	42	1632-3755	75-93	30-45
Velero	Gas Seco	89	1600-5745	80-90	30-53

Tabla 4.1 Datos de interés en pozos no productores de los campos de estudio.

4.3.1 Arcos

Arcos es un campo que comenzó a ser explotado en el año de 1962 en areniscas de tipo deltaico de la Formación Paleoceno Wilcox, con una producción inicial de 26,500 m³ de gas por día, actualmente cuenta con 110 pozos productores y 93 pozos inactivos.

En la figura 4.6 muestra la ubicación de los pozos de los cuales se encontraban disponibles datos de temperatura, es un campo productor de gas seco, como se puede observar se buscó analizar pozos en diferentes zonas del campo con el fin de ver el comportamiento de la temperatura a lo largo de éste

El campo se encuentra entre la ciudad de Mier y la Nueva Ciudad de Guerrero, la accesibilidad al campo, su cercanía con ciudades y poblados hacen de los pozos excelentes prospectos para el aprovechamiento geotérmico.



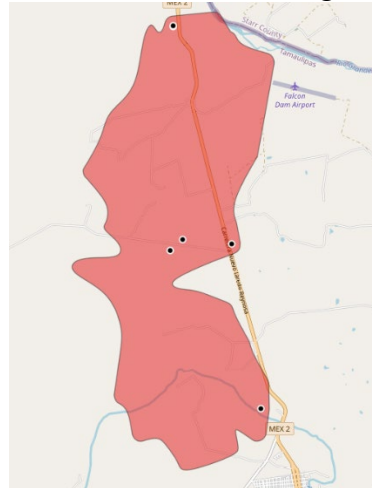


Figura 4.6. Campo Arcos.

4.3.2 Comititas

Comititas contiene sedimentos detríticos que en conjunto con las fallas presentes en el campo dieron origen a importantes plays petroleros y a la geopresurización de los fluidos del campo, Comititas es productos de gas seco y gas condensado y de acuerdo con los registros de producción cuenta con gradientes de entre 40 y 52 °C/km.

Comititas es un campo que a diferencia de los otros dos estudiados tiene un acceso más limitado, sin embargo, resulta de interés por las temperaturas reportadas en algunos pozos realizados por PEMEX. A pesar de no contar con una estructura tectónica activa o alguna intrusión magmática, la formación de la cuenca y los procesos estructurales aledaños, propiciaron el calor suficiente para que el gradiente geotérmico se comporte de manera anómala (Eguiluz-de Antuñano, 2009).

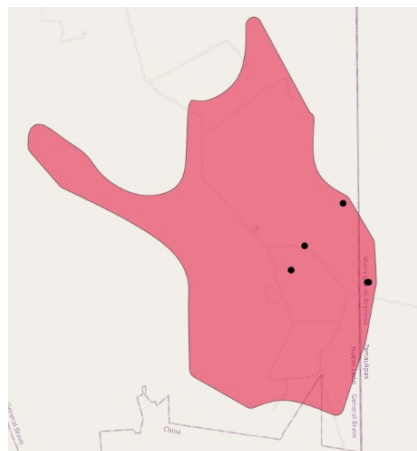


Figura 4.7. Campo Comititas.





4.3.3 *Velero*

Velero al igual que los dos campos anteriores es productor de gas seco en arenas del Paleoceno, el desarrollo del campo se dio en los años 70's, actualmente cuenta con 222 pozos de los cuales 89 no producen.

En cuanto a su ubicación se encuentra al noroeste del campo Arcos a un costado de la Nueva Ciudad de Guerrero es un campo que presenta interesantes gradientes geotérmicos y varios de sus pozos sobrepasan los 5000 m de profundidad. Al igual que en los otros campos se intentó obtener datos de diferentes partes de complejo para tener una perspectiva de la distribución de su temperatura Figura 4.8.

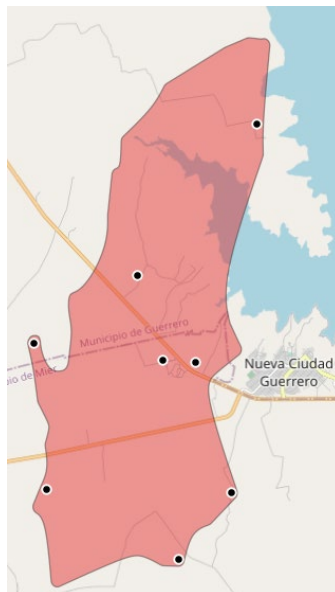


Figura 4.8. *Campo Velero.*



4.4 Pozos prospecto

Debido a la escasez en los datos de temperatura de los pozos para el análisis de estos campos de un total de un total de 72 pozos revisados se filtraron 19 pozos, 6 pozos del campo Arcos, 5 pozos de Comitas y 8 pozos de Velero, los cuales como se podrá observar tenían mediciones de temperatura provenientes de las pruebas de presión realizadas en cada pozo, los datos se muestran en la Tabla siguiente.

Campo	Pozo	Profundidad [m]	Gradiente geotérmico [°C/KM]	Estado	Temperatura de fondo [°C]
ARCOS	Arcos 38	3250	44	Inactivo	143
	Arcos 50	3350	45	Inactivo	151.3
	Arcos 71	2900	45	Productor	130.7
	Arcos 89	2980	44	Inactivo	132
	Arcos 530	2370	44	Inactivo	105
	Arcos 536	2740	45	Inactivo	123
COMITAS	Comitas 1	1570	52	Productor	82
	Comitas 30	2140	52	Productor	112
	Comitas 86	2220	51	Cerrado	114
	Comitas 92	2250	49	Inactivo	112
	Comitas 99	2320	46	Productor	108
Velero	Velero 1	1300	53	Productor	69
	Velero 2026	17000	47	Inactivo	80.79
	Velero 2032	1650	51	Productor	84.31
	Velero 2060	1800	51	Productor	92.61
	Velero 2138	1330	52	Productor	69.74
	Velero 2165	2200	43	Productor	95.76
	Velero 2182	2330	43	Productor	101
	Velero 2188	2350	45	Productor	105

Tabla 4.2 Datos de interés en pozos no productores de los campos de estudio.





Capítulo 4 Análisis de los pozos con potencial geotérmico en México, caso de estudio

La tabla anterior presenta los datos reales de temperatura y profundidad de 19 pozos, dichos datos provienen de la base de datos de la CNH, como se puede ver existen temperaturas variadas, algunas más altas como es en el caso del campo Arcos y las más bajas que se encuentran en Velero, aun así no sería correcto analizar solamente las temperaturas altas puesto que en el aprovechamiento de la fuentes geotérmicas en pozos petroleros es importante tomar en cuenta la profundidad de los pozos para tener un mejor desempeño de su fuente calorífica,

En la figura 4.9 la cual al igual que la 4.4, es una comparación del diagrama de Lindal con los pozos estudiados, muestra las oportunidades que los 19 pozos ofrecen en los usos directos de la energía geotérmica y son resultados alentadores puesto que a pesar de contener fuentes de media y baja temperatura su escasa profundidad la cual se encuentra entre 2000 y 300 metros permitiría una extracción más eficaz del calor en el pozo, en el caso de la figura 4.9 14 de los 19 pozos graficados se ubican en este rango lo que permite que la temperatura de fondo incremente por encima de los 100 °C y de acuerdo con el diagrama de Lindal tales temperaturas permiten distintas formas de usos geotérmicos y en algunos casos incluso se podría pensar en generación eléctrica.

Tal es el caso del campo Comititas el cual ya se ha evaluado en otros trabajos desde un punto de vista eléctrico, demostrando que el campo Comititas en su evaluación mediante el método volumétrico de Garg y Combs, tuvo un aproximado de 4 MW mediante una planta de ciclo binario, dichos resultados permiten considerar que la energía eléctrica generada pudiese ser adicionada a la red eléctrica mexicana, teniendo la capacidad de abastecer a aproximadamente 4,000 familias. (Mata, Evaluación del potencial geotérmico del Campo Comititas en la Cuenca de Burgos, 2021)

Por otro lado, si bien Velero y Arcos no han sido analizados como prospectos para generación eléctrica, las temperaturas presentes en estos campos son potenciales para este tipo de aprovechamiento y a diferencia de Comititas son mejores prospectos para los usos directos debido a su cercanía con zonas pobladas y la accesibilidad a los campos por medio de carreteras y caminos.





Capítulo 4 Análisis de los pozos con potencial geotérmico en México, caso de estudio

De acuerdo con la Secretaría de Economía, Tamaulipas es un estado donde unos de sus principales sectores estratégicos-económicos el turismo, ganadería y la agroindustria, estos sectores son áreas en las cuales el calor geotérmico de baja y media entalpia podría participar de forma importante.



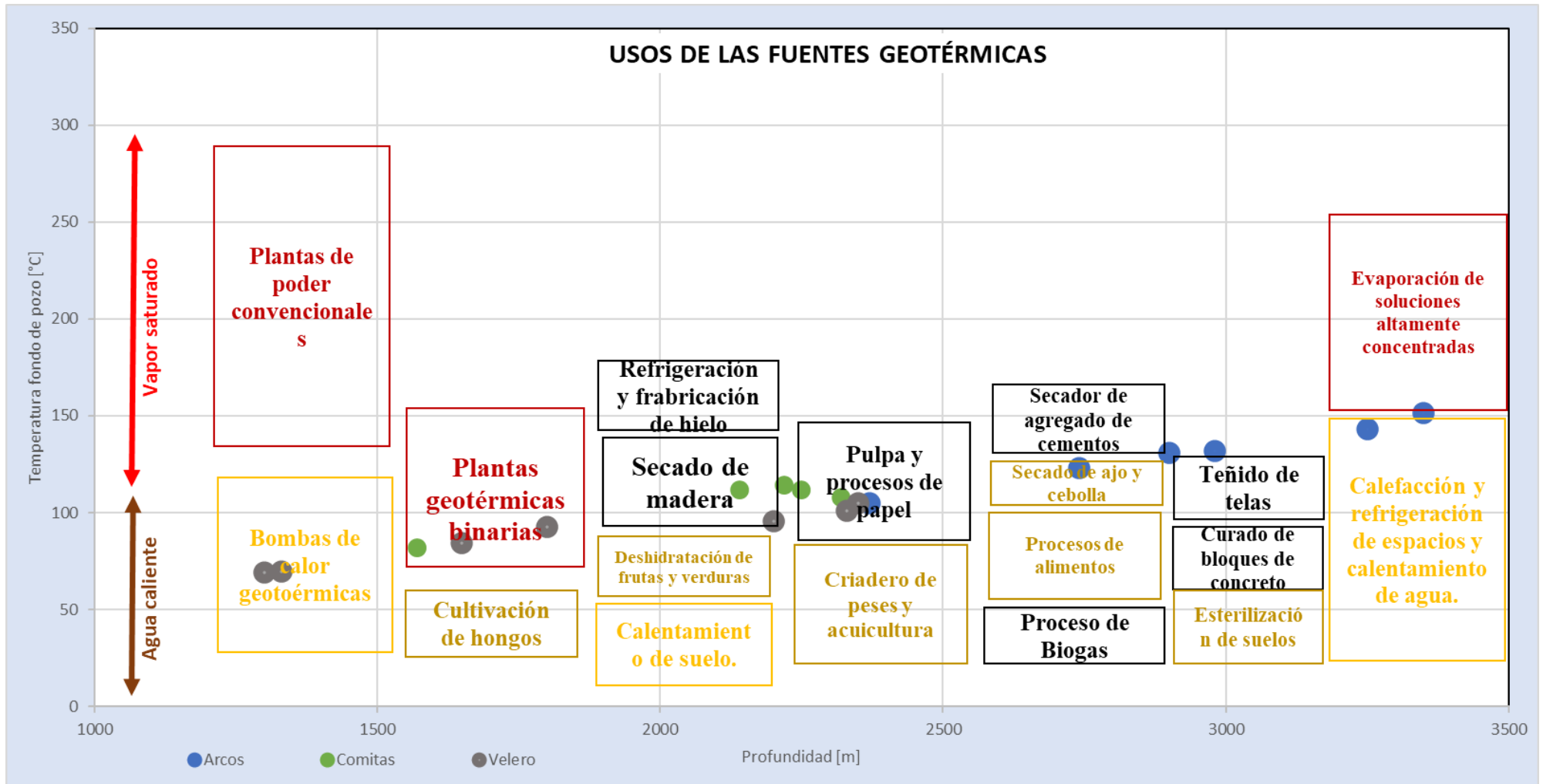


Figura 4.9. Usos aplicables en los pozos estudiados.



4.4.1 Comparación casos de estudio

De acuerdo con la investigación realizada los 19 pozos presentados en la figura anterior se encuentran dentro del rango de otros proyectos exitosos alrededor del mundo, Robert Caulk menciona que las temperaturas del fondo del pozo en los campos de su estudio en California dependen del flujo de calor de la corteza y de la profundidad del pozo, pero en general las temperaturas oscilan entre 40 y 70 °C con algunos pozos que alcanzan hasta 90 °C a estas profundidades y temperaturas son adecuados para uso directo EGS de baja temperatura como distrito calefacción o calefacción de invernaderos. (Robert A. Caulk, 2017)

En la figura 4.10 se puede visualizar una comparación de las temperaturas de los distintos proyectos estudiados y las profundidades que presentan los campos, como ya se ha mencionado un campo que presenta temperaturas altas como es el caso de los ubicados en California, no siempre son las mejores opciones puesto que la profundidad puede ser demasiada profunda que la extracción del calor podría no llegar a ser la esperada, por esto mismo campos como los estudiados por Alimonti 2021, fueron, a pesar de las bajas temperaturas, capaces de generar energía eléctrica y esto si bien depende de varios factores (fluido portador, diámetro de la tubería, gradiente, aislamiento del pozo, gasto de producción, etc.), tiene que ver en gran medida con la poca profundidad de los pozos lo cual permite una mejor extracción del calor.

Dentro de este mismo gráfico se encuentra los campos analizados los cuales presentan temperaturas de interés debido a las profundidades promedio de sus pozos, viendo su estado de estos campos se puede aseverar la posibilidad de aplicar usos directos en estos e incluso con la correcta tecnología generar energía eléctrica.





Capítulo 4 Análisis de los pozos con potencial geotérmico en México, caso de estudio

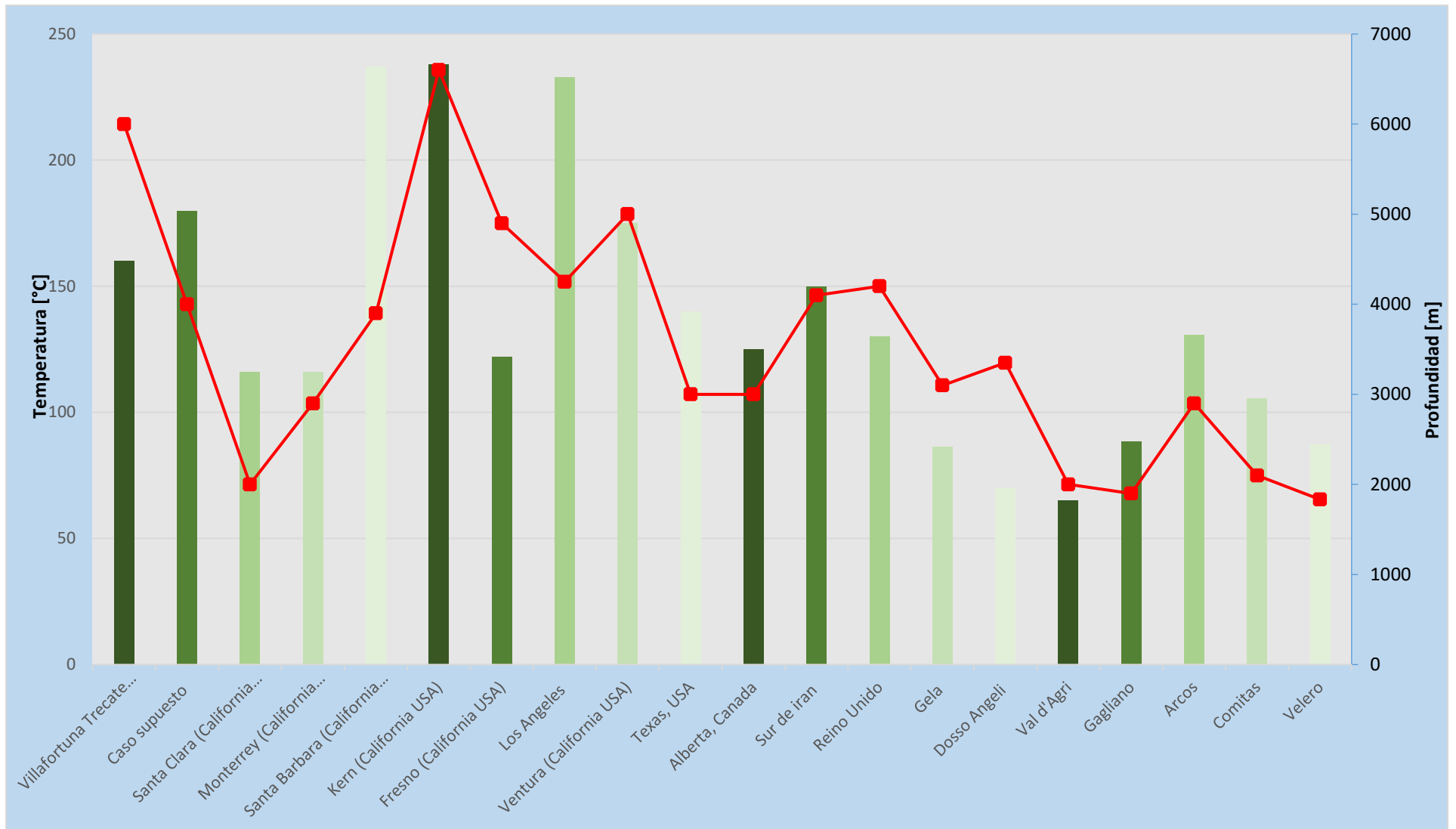


Figura 4.10. Comparación de profundidades y temperaturas entre proyectos de AOGW alrededor del mundo y los campos de estudio en México. Elaboración propia



5 Conclusiones.

México siempre ha sido un país megadiverso provisto de todos tipos de recursos naturales, en aspectos energéticos el petróleo ha sido parte vital del desarrollo nacional sin embargo es hora de mirar hacia otras fuentes de energía, que sean limpias, sustentables y renovables. La Geotermia es una fuente capaz de proveer todo tipo de necesidades energéticas desde generación eléctrica hasta calefacción y procesos industriales. La cantidad de pozos perforados durante la explotación de hidrocarburos es considerable y sin duda es posible hacer algún tipo de adecuación técnica para aprovechar recursos geotérmicos como legal para impulsar esta aplicación en los pozos abandonados o con potencial geotérmico.

Basado en la descripción de las oportunidades que México tiene como potencia geotérmica y las complicaciones que surgen en el desarrollo de ésta se concluye lo siguiente.

- México necesita inicialmente un cambio en la regulación de la industria petrolera principalmente en el manejo y desarrollo de los pasivos petroleros para uso geotérmico como lo son los pozos abandonados o inactivos, puesto que no existe como tal un apartado que permita el desarrollo geotérmico en pozos petroleros.
- En conjunto con el punto anterior es necesario implementar nuevas leyes que faciliten que las empresas estatales como CFE y PEMEX trabajen en conjunto para poder desarrollar proyectos de este tipo, así mismo permitir a empresas privadas ganadoras de contratos el poder explotar recursos geotérmicos, así como petroleros para impulsar en mayor magnitud esta área.
- Se demostró de forma sustancial la capacidad geotérmica que México tiene más allá de los campos ya explotados, y se sabe que no es reciente este conocimiento, sin embargo, muy poca información existe referente a este campo, resultaría útil en un futuro desarrollar investigación más profunda en lo referente a gradientes geotérmicos, capacidad térmica de rocas y flujo de calor especialmente en zonas de hidrocarburos, para desarrollar eficazmente la geotermia en zonas petroleras.





6. REFERENCIAS

- Andrew Van Horn, A. A. (2020). New Opportunities and Applications for Closed-Loop Geothermal Energy Systems. *GRC Transactions, Vol, 44, 1*.
- Axel Ramsés Davidovich Castellanos, G. L. (2018). La empresa petrolera en México antes y después de la reforma energética. Una aproximación.
- Barbacki, A. P. (2000). The use of abandoned oil and gas wells in Poland for recovering geothermal heat. *Proceedings World Geothermal Congress 2000, 3361-3365*.
- Benito, J. L. (2020, 07 05). *Energy News*. Retrieved from Energy News: <https://www.energynews.es/geotermia-en-canada/>
- Bennett KP, L. K. (2012). Power generation potential from coproduced. *Thirty-Seventh Work. Geotherm. Reserv.*
- C. Alimonti, E. S. (2016). Study of geothermal power generation from a very deep oil well with a wellbore heat exchanger. *Renewable Energy* , 292-301.
- CanGEA. (2014). *Direct Utilization of Geothermal Energy*:. Alberta, Canada.
- CeMIEGeo. (2014-2019). *¿Qué es la geotermia?* Retrieved from CeMIEGeo: <http://www.cemiegeo.org/index.php/que-es-la-geotermia>
- Cheng, S. W. (2019). Optimization of geothermal energy extraction from abandoned oil well with a novel well bottom curvature design utilizing Taguchi method. *Energy*, 1-11.
- Cheng, W.-L. (2016). Enhancing geothermal power generation from abandoned oil wells with thermal reservoirs.
- Christine Milliken, K. K. (2021, Febrero 5). *Canada: Oil and Gas Laws and Regulation*. Retrieved from Canada: Oil and Gas Laws and Regulation: <https://iclg.com/practice-areas/oil-and-gas-laws-and-regulations/canada>





- Claudio Alimonti, E. S. (2021). Looking forward to a decarbonized era: Geothermal potential assessment for oil & gas fields in Italy. *Geothermics*.
- Claudio Alimonti, E. S. (2021). Looking forward to a decarbonized era: Geothermal potential assessment for oil and gas fields in Italy. *Geothermics*, 93.
- CNH. (2021). *Mapa de hidrocarburos* . Retrieved from Mapa de hidrocarburos : <https://mapa.hidrocarburos.gob.mx/>
- Davis, A. P. (2009). Geothermal power production from abandoned oil wells. *Energy*, 866-872.
- Eguiluz-de Antuñano, S. (2009). The yegua Formation Gas Play in the BurgosBasin, México, in, C. Bartollini and J.R. Román Ramos, eds., *Petroleum systems in the southern Gulf of México. Memoir volumen 90*, 49-77.
- Energy Association (CanGEA. (2014). Direct Utilization of Geothermal Energy: Suitable Applications and Opportunities for Canada. 1-27. Retrieved from www.cangea.ca
- ENRÍQUEZ, G. G. (2013). Análisis Comparativo de Desarrollo Entre Petrobras y Pemex: Experiencias y lecciones del siglo XXI.
- Fanelli, M. H. (2003). *Geothermal Energy: utilization technology* . Bangalote, India: Jouve.
- Fiorella Alvino, G. B. (2021, Febreror 5). *Italy: Oil and Gas Laws Regulations* . Retrieved from Italy: Oil and Gas Laws Regulations : <https://iclg.com/practice-areas/oil-and-gas-laws-and-regulations/italy>
- Friedman, J. (2009). Geothermal Energy for Greenhouses. *USDA Forest Service Proceedings*, 17-18.
- Gong B, L. H. (2011). Effect of water injection on reservoir temperature. *Proc. Thirty-Sixth Work*.
- Gutiérrez-Negrín, L. C.-J.-L. (2020). Geothermal energy in Mexico: update and perspectives. *Proceedings World Geothermal Congress 2020*.
- Gutiérrez-Negrín, L. M.-G.-L. (2015). Present Situation and Perspectives of Geothermal in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress*.





- J.D. Templeton, S. G.-M.-K. (2014). Abandoned petroleum wells as sustainable sources of geothermal energy. *Energy*, 366-373.
- Jorquera, c. (2018, abril 4). *Piensa en Geotermia* . Retrieved from Piensa en Geotermia : <https://www.piensageotermia.com/italia-como-la-bella-durmiente-de-la-energia-geotermica-rezagada-en-desarrollo/#:~:text=En%20Italia%2C%20la%20energ%C3%ADa%20geot%C3%A9rmica%20est%C3%A1%20presente%20solo,para%20la%20generaci%C3%B3n%20de%20energ%C3%ADa%20pr>
- Jorquera, C. (2020, octubre 19). *Piensa en Geotermia*. Retrieved from Piensa en Geotermia: <https://www.piensageotermia.com/produccion-de-electricidad-a-partir-de-pozos-de-petroleo-primeros-resultados-de-pruebas-de-campo-en-francia/>
- Jorquera, C. (2020, enero 14). *Piensa en Geotermia* . Retrieved from Piensa en Geotermia : <https://www.piensageotermia.com/nuevas-regulaciones-sobre-exploracion-y-explotacion-geotermica-lanzadas-en-francia/>
- Jorquera, c. (2021, Septiembre 5). *Piensa en Geotermia*. Retrieved from Piensa en Geotermia: <https://www.piensageotermia.com/esperamos-que-los-incentivos-geotermicos-vuelvan-pronto-a-italia/>
- Kujawa, T. N. (2006). Utilization of existing deep geological wells for acquisitions of geothermal energy. *Energy* 31, 650-664.
- Leandra M. Weydt, C.-D. J. (2018). From oil field to geothermal reservoir: assessment for geothermal utilization of two regionally extensive Devonian carbonate aquifers in Alberta, Canada. *European Geosciences Union*, 953-983.
- Library of Congress . (n.d.). *Oil and Gas Industry: A Research Guide*. Retrieved from Oil and Gas Industry: A Research Guide: <https://guides.loc.gov/oil-and-gas-industry/laws/agencies>
- Limpasurat A, F. G. (2010). Artificial geothermal potential of steam-flooded heavy oil fields . *Int J Oil Gas Coal*, 31-46.
- Lund, J. T. (2020). Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. *Proceedings World Geothermal Congress 2020*.





- Lund, J. T. (2020). Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. *Proceedings World Geothermal Congress 2020*.
- Mata, I. T. (2021). Evaluación del potencial geotérmico del Campo Comititas en la Cuenca de Burgos. 5.
- Mata, I. T. (2021). Evaluación del potencial geotérmico del Campo Comititas en la Cuenca de Burgos. *UNAM*, 39.
- McKenna JR, B. D. (2005). Geothermal electric power. *Oil Gas J*, 34-40.
- MexMedia Group. (2013, Octubre 12). *Reestructurando Petróleos Mexicanos. La necesaria Reforma*. Retrieved from Empresarios AEM:
<http://www.empresariosaem.com/reestructurandopetroleos-mexicanos-la-necesaria-reforma-energetica/>
- Milliken, M. (2007). GEOTHERMAL RESOURCES AT NAVAL PETROLEUM RESERVE-3 (NPR-3), WYOMING . *Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- Moeck. (2013). Classification of geothermal Plays According to Geological Habitats. *Academy Report*, 10.
- NOWAK, T. K. (2000). MODIFIED THERMAL CALCULATIONS OF A GEOTHERMAL DOUBLE-PIPE HEAT EXCHANGER IMMERSSED INTO GEOTHERMAL DEPOSIT. *World Renewable Energy Congress V*, 2-4.
- Oil and Gas info. (n.d.). *Facts about Canada's*. Retrieved from Facts about Canada's:
<https://oilandgasinfo.ca/all-about-fracking/regulatory/>
- Oilprice. (2022, ENERO 23). *WORLD ENERGY TRADE*. Retrieved from WORLD ENERGY TRADE: <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/agua-y-vapor/cuando-aprovechara-estados-unidos-su-enorme-potencial-de-energia-geotermica>
- Organo oficial de la camara de diputados del congreso de los Estados Unidos Mexicanos . (2021, Marzo 2). *Diario de los Debates*. Retrieved from Diario de los Debates:
<http://cronica.diputados.gob.mx/DDEbates/64/3er/2Ord/mar/Apendice-9.html>





- Prol-ledesma, R. M. (2020). Geopressed geothermal resources in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress*, 1-8.
- Reyes, A. G. (2007). Abandoned oil and gas wells: a reconnaissance study of an unconventional geothermal resource. *GNS Science Report* , 2-25.
- Robert A. Caulk, M. G. (2017). Reuse of abandoned oil and gas wells for geothermal energy. *Renewable Energy* , 388-397.
- Rosa María Prol-Ledesmaa, D. J.-Z. (2019). Heatflow and geothermal provinces in Mexico. *Geothermics* , 193-200.
- Saleh B, K. G. (2007). *Working fluids for low temperature organic rankine cycles energy* .
- Sanyal, S., & Butler, S. (2010, April 29). Geothermal Power Capacity from Petroleum Wells – Some Case Histories of Assessment. Bali, Indonesia.
- Speed-Bost, R. (2021, Febrero 5). *USA: Oil and Gas Laws and Regulations* . Retrieved from USA: Oil and Gas Laws and Regulations : <https://iclg.com/practice-areas/oil-and-gas-laws-and-regulations/usa>
- T. Kujawa, W. N. (2005). ANALYSIS OF THE EXPLOITATION OF EXISTING DEEP PRODUCTION WELLS FOR ACQUIRING GEOTHERMAL ENERGY. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 78, No. 1,*.
- Thierry Lauriol, M. L. (2021 , Febrero 5). *France: Oil and Gas laws and Regulation* . Retrieved from France: Oil and Gas laws and Regulation : <https://iclg.com/practice-areas/oil-and-gas-laws-and-regulations/France>
- Toth, j. W. (2020). Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. *Proceedings World Geothermal Congress* .
- Wen-Long Cheng, T.-T. L.-L.-L. (2013). Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells. *Energy*, 284-254.
- Wigth, N., & Bennett, N. (2015, june). Geothermal energy from abandoned oil and gas wells using water in. United kinddom.
- Xianbiao Bu, W. M. (2012). Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells. *Renewable Energy*, 80-85.





- Xiaolei Liu, G. F. (2018). A systematic study of harnessing low-temperature geothermal energy from oil and gas reservoirs. *Energy*, 346-355.
- Xin S, L. H. (2012). Electrical power generation from low temperature. *Thirty-Seventh*.
- Yong-Le Nian, W.-L. C. (2018). Insights into geothermal utilization of abandoned oil and gas wells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1.
- Younes Noorollahia, M. P. (2015). Numerical simulation of power production from abandoned oil wells in Ahwaz oil field in southern Iran. *Geothermics*, 16-23.
- Zhang, L. (2008). Energy from abandoned oil and gas reservoirs. *"Gas Now: Delivering on Expectations"*.

