



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Factibilidad del aprovechamiento de bombas de calor
geotérmicas para localidades de México**

TESIS PROFESIONAL

Para obtener el título de

INGENIERO MECÁNICO

ÁREA

Termoenergía

PRESENTA:

ORTEGA GÓMEZ NURIBAN ARTURO

DIRECTOR DE TESIS:

M. en I. Héctor Aviña Jiménez



Ciudad Universitaria, México



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Objetivo general

- Seleccionar y diseñar una bomba de calor geotérmica (con sumidero de calor en acuífero) más conveniente para la localidad de Mexicali, Baja California. Así como realizar un análisis de factibilidad del proyecto.

Objetivo particulares

- Mostrar los aspectos generales sobre la geotermia, sus usos directos y el desarrollo de las bombas de calor geotérmicas a nivel mundial.
- Establecer las principales características de las bombas de calor geotérmicas comúnmente usadas en la industria, para con base en ello determinar la configuración conveniente para el caso a analizar.
- Determinar la carga térmica de la vivienda propuesta para con base en ello, realizar el análisis del equipo seleccionado considerando los aspectos termodinámicos.
- Determinar los principales parámetros y condiciones operativas que provocan un buen desempeño de las bombas de calor geotérmicas.
- Realizar la factibilidad de la implementación de la bomba de calor geotérmica considerando aspectos tanto económicos como ambientales.

Resumen

Uno de las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero en el planeta es causado debido al consumo eléctrico doméstico. Actualmente se han desarrollado algunas tecnologías con el fin de reducir las emisiones gases de efecto invernadero.

Una de las tecnologías renovables que más se han desarrollado en México es la geotermia. Esto se debe a que, gracias a las condiciones geográficas y geológicas del país, existe una gran actividad geotérmica a lo largo del país. Sin embargo, debido a la facilidad y viabilidad económica, en el país únicamente se han explotado los recursos geotérmicos de alta entalpía.

Uno de los principales problemas de la implantación de las tecnologías renovables es la disponibilidad del recurso, únicamente se puede trabajar con el recurso disponible en cada zona. Y en algunos casos dependen de factores climáticos que difícilmente se pueden controlar o predecir.

Las bombas de calor geotérmicas presentan una solución al problema de disponibilidad del recurso. Debido a que la temperatura del subsuelo o de un cuerpo específico de agua es prácticamente constante a una profundidad específica y esta temperatura es prácticamente independiente de los factores climáticos externos si se tiene la profundidad correcta.

Con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero generadas debido al consumo eléctrico doméstico en México y debido a su disponibilidad, en el presente trabajo se analiza la posibilidad de implantar esta tecnología a lo largo del país.

Es por ello que, antes de comenzar con el estudio, se muestra un estado de arte global que involucra los temas de interés, comenzando con la situación actual y disponibilidad de los recursos geotérmicos a nivel global y a nivel del país. Todo esto seguido de la importancia y poco aprovechamiento de los usos directos de la geotermia en México, seguido de una revisión del principio de funcionamiento y los principales elementos que conforman las bombas de calor geotérmicas.

Con base en lo anterior se realizó el cálculo de la carga térmica en una vivienda en la localidad de Mexicali (una de las ciudades que más energía utiliza para alimentar sus sistemas de aire acondicionado). Para poder realizar una dimensionalización y diseño del sistema de enfriamiento mediante una bomba de calor geotérmica, con la finalidad de obtener la mayor cantidad de datos que permitiera conocer los aspectos técnicos suficientes para realizar una evaluación del desempeño del equipo.

El estudio se realizó con el fin de establecer la factibilidad de instalar estos sistemas a lo largo del país, debido a que los sistemas de enfriamiento o calefacción mediante bombas de calor geotérmicas son costosos en un inicio debido a la instalación. A pesar que estos sistemas son extremadamente eficientes y no utilizan tanta energía como los sistemas convencionales, debido a su costo, si es imposible para las personas realizar esta inversión, no será posible la instalación de estos equipos.

En el último capítulo se analiza el ahorro de energía que estos equipos tienen así como posibles financiamientos públicos que se tienen en el país con el fin de impulsar el uso de tecnologías renovables en las viviendas del país.

Tabla de contenido

Objetivo general.....	2
Objetivo particulares.....	2
Resumen.....	2
1 Antecedentes	9
1.1 Introducción.....	9
1.2 Panorama Mundial de la Energía	9
1.3 Panorama Local de la Energía	12
1.4 Energías Renovables.....	14
1.5 Energía Geotérmica.....	15
1.6 Panorama Mundial de la Energía Geotérmica	16
1.7 Panorama Local de la Energía Geotérmica	17
1.8 Usos Directos de la Geotermia en México	19
1.9 Conclusiones.....	21
2 Bombas de Calor Geotérmicas.....	22
2.1 Introducción.....	22
2.2 Antecedentes	22
2.3 Bombas de calor geotérmicas	23
2.4 Panorama General de las Bombas de Calor Geotérmicas.....	24
2.5 Principio de funcionamiento	26
2.5.1 Enfriamiento.....	28
2.5.2 Calefacción	29
2.6 Tipos de bombas de calor (geotérmicas configuraciones).....	30
2.7 Ventajas y desventajas.....	31
3 Análisis técnico de las bombas de calor.....	33
3.1 Introducción	33
3.2 Equipos principales de las bombas de calor.	33
3.2.1 Compresor.....	33
3.2.2 Válvula de expansión.....	37
3.2.3 Intercambiadores de calor	38
3.3 Optimización de las bombas de calor geotérmicas.....	42
3.3.1 Intercambiadores de calor	42



3.3.2	Compresores	45
3.3	Parámetros de rendimiento	46
3.3.1	Coficiente de operación	46
3.3.2	Eficiencia de refrigeración.....	47
3.3.3	Capacidad volumétrica específica de enfriamiento.....	47
3.4	Configuración avanzada de las bombas de calor geotérmicas	48
3.4.1	Válvula reversible	48
3.4.2	Configuración en cascada.....	51
4	Bombas de calor geotérmicas en México	53
4.1	Introducción	53
4.2	Antecedentes	53
4.3	Potencial.....	54
4.3.1	Recursos geotérmicos de baja entalpia en México.....	54
4.3.2	Recursos humanos y económicos	57
4.4	Alcance	58
5	Análisis técnico-económico de caso.....	59
5.1	Introducción	59
5.2	Consideraciones	60
5.3	Carga Térmica.....	61
5.3.1	Ventanas.....	62
5.3.2	Muros	63
5.3.3	Techo	65
5.3.4	Cargas internas.....	65
5.4	Bomba de calor	66
5.4.1	Enfriamiento.....	66
5.5	Análisis de Factibilidad.....	67
6	Conclusiones.....	71
7	Trabajo a futuro	72
8	Anexos.....	72
9	Bibliografía	79

Lista de figuras

Figura 1-1 Generación Eléctrica Mundial de 1971 a 2009	10
Figura 1-2 Comparación entre los años 1973 y 2009 en Generación Eléctrica Mundial	10
Figura 1-3 Generación bruta del servicio público por tipo de tecnología.....	13
Figura 1-4 Capacidad Instalada Mundial de los años 1960 a 2012	16
Figura 1-5 Mapa tectónico de la república mexicana	18
Figura 1-6 Centrales geotermoeléctricas en la república mexicana	18
Figura 1-7 Evolución de la generación geotermoeléctrica en México (1980-2011)	19
Figura 2-1 Diagrama esquemático de una bomba de calor	23
Figura 2-2 Variación de la temperatura del subsuelo con respecto a la distancia y el día del año ..	27
Figura 2-3 Configuración de Bomba de Calor para enfriamiento	28
Figura 2-4 Configuración de bomba de calor para calefacción.....	29
Figura 2-5 Bombas de calor conectadas al subsuelo	30
Figura 2-6 Bombas de calor con fuente subterránea de agua	31
Figura 2-7 Bombas de calor acopladas a una fuente superficial de agua	31
Figura 3-1 Esquema básico de compresor monofásico.....	34
Figura 3-2 Ciclo ideal de un compresor sin espacio muerto	35
Figura 3-3 Ciclo ideal de un compresor con espacio muerto.....	35
Figura 3-4 Diagrama T-s y P-h de bomba de calor simple.....	37
Figura 3-5 Volumen de control para válvula de expansión.....	37
Figura 3-6 Configuraciones de flujos en intercambiadores de calor.....	40
Figura 3-7 Principio de funcionamiento de válvula reversible.....	49
Figura 3-8 Válvula reversible convencional	50
Figura 3-9 Configuración mecánica de válvula reversible.....	50
Figura 3-10 Esquema de bomba de calor de dos etapas con intercambiador de calor	52
Figura 4-1 vol 24.2.....	54
Figura 5-1 Plano de vivienda a analizar	62
Figura 5-2 Carga térmica generada por ventanas en Baja California para vivienda a analizar (Orientación Este).	63
Figura 5-3 Carga térmica generada por muros en Baja California para vivienda a analizar (Orientación Este).	64
Figura 5-4 Carga térmica generada por el techo en Baja California para vivienda a analizar (Orientación Este).	65
Figura 5-5 Diagrama en cascada de bomba de calor geotérmica a analizar.....	66
Figura 5-6 análisis termodinámico de bomba de calor geotérmica.....	67
Figura 5-7 Cuotas mensuales en verano para Baja California.....	68
Figura 5-8 Ahorro eléctrico anual de bomba de calor geotérmica	68
Figura 5-9 Tabla de valores presentes para bomba de calor geotérmica.....	69
Figura 5-10 Tabla de valores presentes considerando subsidio	70

Lista de tablas

Tabla 1-1 Emisiones de Toneladas de Dióxido de Carbono Anual	12
Tabla 1-2 Los Usos Directos de la Geotermia en México	21
Tabla 2-1 Usos directos en el mundo 1995-2010.....	24
Tabla 4-1 vol 24.2	56
Tabla 4-2 Personal profesional dedicado a actividades geotérmicas (Únicamente personal con título profesional).....	57
Tabla 4-3 negrin current status of geothermics in Mexico	58

Nomenclatura

IEA Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency)

BCG Bomba de Calor Geotérmica

LMTD Diferencia de Temperaturas Media Logarítmica (Log Mean Temperature Difference)

AGM Asociación Geotérmica Mexicana

IIE Instituto de Investigaciones Eléctricas.

T Temperatura

W Trabajo mecánico

Q Calor

η Eficiencia

V Volumen

ν Volumen específico

P Presión

C Espacio muerto

n Índice politrópico de gas ideal

Y Relación de calores específicos

M Masa molar

q Transferencia de calor

A Área

U Coeficiente global de transferencia de calor

Δt Diferencia de temperaturas

F Factor de corrección

CR Relación de Compresión (Compression Relation)

COP Coeficiente de Operación

CFE Comisión Federal de Electricidad

EJ Exajule

Kw Kilowatt

CONAE Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía

PPM Partes Por Millón

Kcal Kilocalorías

Kg Kilogramo

m Masa

°C Grados Celsius

°F Grados Fahrenheit

K Coeficiente de transferencia de calor por conducción

h hora, coeficiente de transferencia de calor por convección

INFONAVIT Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores

FIDE Fideicomiso para el ahorro de energía eléctrica

CONAVI Comisión Nacional de Vivienda

SEDATU Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano

Subíndices

co Compresor

ev Evaporador

del Espacio acondicionado

s Sumidero de calor

O Condiciones de estancamiento o reposo

m media

m,ef media efectiva para configuración en contraflujo

e enfriamiento

c calefacción

i Ideal

r Real

Antecedentes

1.1 Introducción.

En este capítulo se darán las generalidades del uso y aprovechamiento de la energía geotérmica en el mundo y en México. Sin embargo para fines de este estudio, únicamente nos enfocaremos en la energía geotérmica de baja entalpia; tomando en cuenta las dos grandes ramas de la energía geotérmica, generación eléctrica y usos directos. El tema principal de la tesis, las bombas de calor geotérmicas serán mencionadas en detalle hasta el siguiente capítulo.

1.2 Panorama Mundial de la Energía

La situación energética es crítica en varios sentidos hoy en día. Por un lado tenemos el tan mencionado calentamiento global, debido al uso no adecuado que ha hecho la humanidad de los combustibles fósiles por más de 100 años y por el otro lado se tiene escases de estos mismos combustibles en relación con el crecimiento excesivo de la humanidad.

Muchas personas argumentan que hay gran cantidad de combustibles fósiles aún y que no es necesario implementar estas tecnologías hasta que estos se hayan acabado. Sin embargo, cada vez es más difícil y costoso extraer estos combustibles. Tarde o temprano llegará un día en el que el precio de extraer un barril de petróleo sea más caro que el propio barril de petróleo por lo que la idea de buscar otras alternativas a los combustibles fósiles debe ser imperativa.

Actualmente se tienen muchas alternativas energéticas para estos problemas, las llamadas energías renovables, verdes o limpias. Las energías renovables son aquellas que buscan una alternativa a los medios de producción de energía basados en combustibles fósiles, con un enfoque sustentable. Sin embargo, esto se verá con más detalle adelante.

Es cierto que en los últimos años ha existido un aumento en la cantidad de energía producida por fuentes alternas de energía, sin embargo, la base de la producción sigue estando mayoritariamente regidas por los combustibles fósiles. En las siguientes figuras se puede observar cómo ha cambiado la producción de energía eléctrica desde el año 1971.

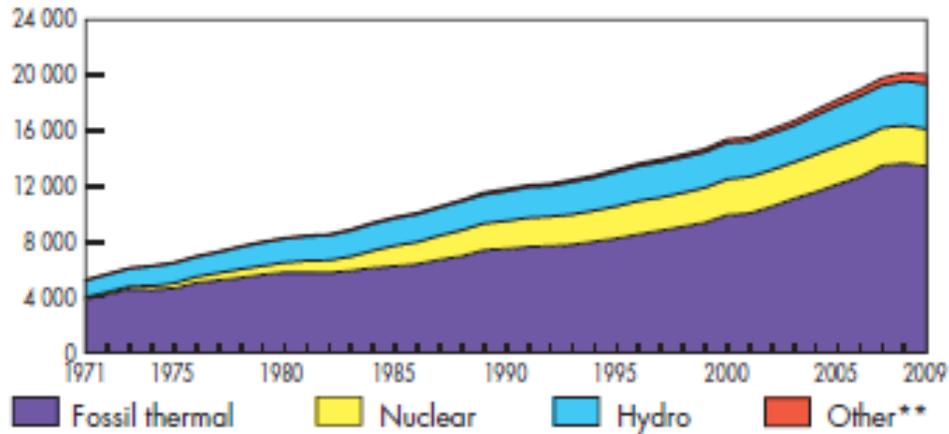


Figura 0-1 Generación Eléctrica Mundial de 1971 a 2009¹

Podemos observar como la dinámica de generación eléctrica no cambió a lo largo de los años, simplemente aumento en escala; manteniendo la hegemonía de los combustibles fósiles sobre las demás fuentes.

1971 y 2009 fuentes de generación eléctrica

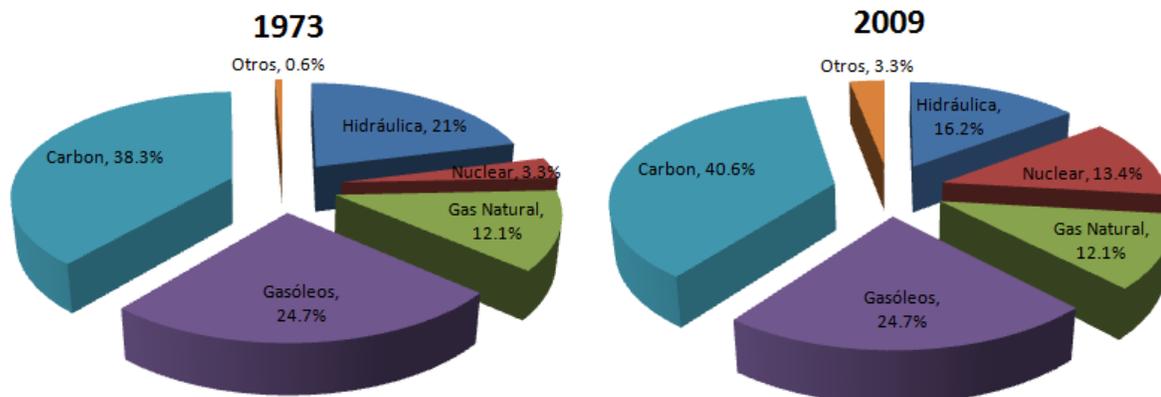


Figura 0-2 Comparación entre los años 1973 y 2009 en Generación Eléctrica Mundial ²

Mucho de esto se debe a que las fuentes alternas de energía apenas están en desarrollo por lo que hoy en día aún siguen siendo, en algunos casos, poco atractivas económicamente. En comparación con los sistemas de producción tradicionales, las fuentes de energía alternativa son muy jóvenes y

¹ International Energy Agency, 2011

² *Ibidem.*

en algunos de los casos, para potencias grandes se requieren aún de años de investigación e infraestructura.

Lo que se debe hacer es diversificar el aprovechamiento de energía; localizando el aprovechamiento de energía para los mayores consumidores de energía en los sitios donde se tengan recursos naturales y únicamente utilizar los combustibles fósiles cuando no haya otra alternativa. Debido a esto, es necesario que continúen y aumenten las investigaciones sobre las formas de producción de energía renovable.

Lo que mucha gente no tiene en cuenta es que las energías renovables no producen una potencia muy elevada en la mayoría de los casos, por lo cual no siempre cumplen los requerimientos necesarios de los procesos de producción de la humanidad como son los medios de transporte, dichos sistemas requieren de grandes potencias debido a la gran cantidad de peso que requieren transportar. A pesar de que hoy en día algunas plantas de energías renovables, como las eólicas y geotérmicas, pueden producir grandes potencias estas sólo pueden producir en el lugar donde se encuentra el recurso renovable; haciendo caro el transporte de energía a otros lugares. Esta es otra razón por la cual los combustibles fósiles siguen siendo utilizados en la actualidad, la dependencia geográfica de las energías renovables.

Debido a esto, la mayoría de las energías renovables sólo se pueden concentrar para producciones de energía en ciertos lugares y los combustibles fósiles siguen y seguirán siendo necesarios hasta que no se encuentre una forma de aprovechar mejor la energía. Lo que se debe hacer es una diversificación de estos en los procesos de generación eléctrica; generando energía con fuentes renovables donde haya los recursos necesarios y únicamente generar energía por medio de combustibles fósiles cuando no haya otra opción.

El primer paso es reducir el consumo de combustibles fósiles en aplicaciones de baja potencia. El principal consumo de baja potencia que existe se da en uso doméstico. En los últimos años ha habido un gran avance tecnológico para este aspecto.

Diversos intentos e investigaciones se han realizado en lo que respecta a la adaptación de modelos de sustentabilidad en los hogares. Lo que se busca es que los hogares generen su propia energía y alimentos así como un manejo adecuado de sus desechos. Sin embargo, aún se tiene mucho por avanzar en estos rubros.

1.3 Panorama Local de la Energía

La situación energética en nuestro país no es muy diferente a la mundial. Actualmente el 76.6% de la capacidad instalada en el sector eléctrico corresponde a tecnologías que utilizan combustibles fósiles³.

Nuestro país enfrenta el mismo desafío que enfrenta el planeta entero, administrar la forma en la que se genera energía tomando en cuenta el cambio climático. Debido a esto, en los últimos años, la Secretaría de Energía se ha enfocado al desarrollo de fuentes de energías renovables como la hidráulica, eólica, solar, biomasa, entre otras. Todo esto pensando en reducir las emisiones de efecto invernadero.

En el 2011 el país ocupaba el doceavo lugar en emisiones de toneladas de CO₂ según la International Energy Agency. Esto habla de una necesidad real y urgente de reducir las emisiones de CO₂ que nuestro país está emitiendo diariamente. A Continuación se puede observar una tabla donde se muestran los 12 países en el mundo con mayores emisiones de toneladas de CO₂.

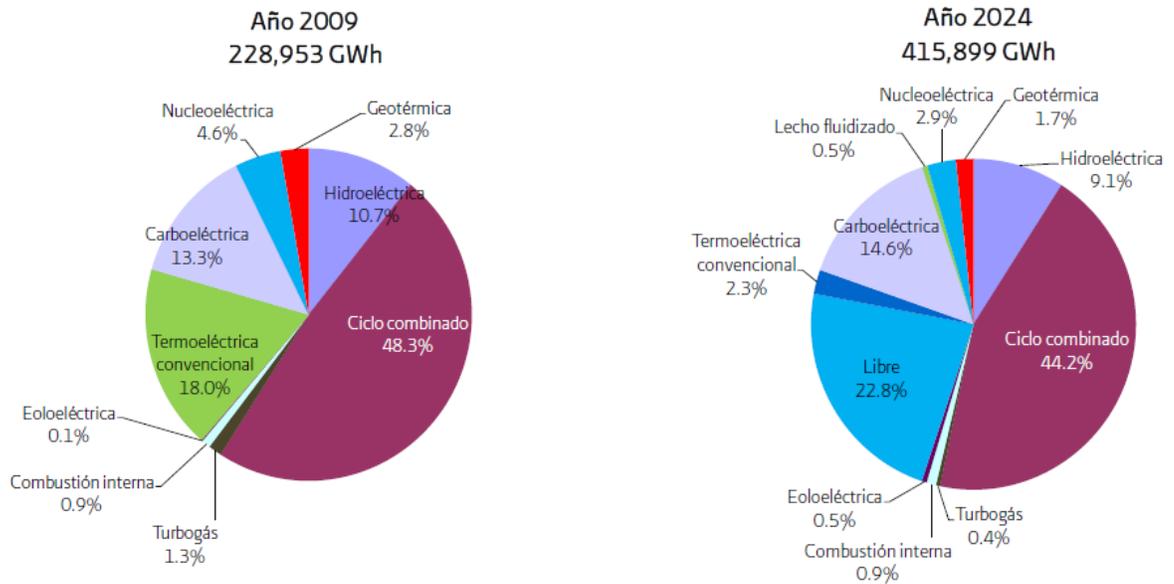
Tabla 0-1 Emisiones de Toneladas de Dióxido de Carbono Anual⁴

Lugar	País	MTon CO ₂
1	Rep. Pop. China	6831.6
2	Estados Unidos	5195.02
3	India	1585.82
4	Rusia	1532.6
5	Japón	1092.86
6	Alemania	750.19
7	Irán	533.2
8	Canadá	520.75
9	Corea del Sur	515.46
10	Reino Unido	465.8
11	Arabia Saudita	410.47
12	México	399.67

³ Secretaría de Energía, 2009

⁴ International Energy Agency, *Op. cit.*, pp. 48-57.

En la Figura 1.3 se puede observar la generación actual bruta del servicio público en México, así como el estimado que se tiene para el 2024.



Nota: Para el periodo enero-septiembre de 2009 se incluyen cifras reales.

Figura 0-3 Generación bruta del servicio público por tipo de tecnología⁵

Como se muestra en la figura anterior, se planea eliminar la producción de energía mediante plantas termoeléctricas convencionales y tomando en cuenta que el 22.8% libre está destinado mayoritariamente a energías renovables se puede hablar de una prospectiva muy ambiciosa respecto a las fuentes de energía alternas.

Sin embargo, esto no es más que un escenario ideal, aún queda mucho por hacer y no se sabe si se vaya a cumplir del todo con las metas establecidas. A pesar de todo esto, por lo menos se muestra la intención de que habrá una disposición y apertura a las energías alternas por parte del gobierno.

⁵ Secretaría de Energía, *Op. cit.*, p. 142.

1.4 Energías Renovables

Como se mencionó con anterioridad, las energías renovables son aquellas que buscan una alternativa a la producción de energía basada en combustibles fósiles y que mantienen un enfoque sustentable.

Definir sustentabilidad es un poco complicado debido a que no existe un consenso claro de la definición de sustentabilidad. Sin embargo, es más sencillo explicar en qué consiste el enfoque sustentable de las fuentes alternas de energía.

El enfoque de sustentabilidad busca que los sistemas –ya sean individuos, aparatos o incluso ciudades- produzcan la misma cantidad de recursos que van a utilizar tomando en cuenta las futuras generaciones. Esto quiere decir que no basta con que todos generen sus propios recursos, se tiene que tomar en consideración que existe una cantidad limitada de recursos naturales y se debe buscar que la forma en la que se generen los recursos no agote las reservas del planeta.

Desde el enfoque energético, sustentabilidad se refiere a aquellas fuentes de energía las cuales:⁶

- No son agotadas fácilmente después de un uso continuo.
- Su uso no lleva a la emisión de contaminantes o situaciones peligrosas para el medio ambiente a una escala sustancial.
- Su uso no involucra peligros a la salud en una escala sustancial o involucra injusticias sociales.

Respecto a cuales tipos de energía son alternas hay mucha controversia debido a la misma definición de sustentabilidad. Sin embargo, para efectos de este trabajo se clasificaran las energías desde un enfoque sustentable en dos grandes grupos⁷.

Fuentes solares

a) Directas

- Solar térmica
- Solar fotovoltaica

⁶ Godfrey Boyle, Bob Everett and Janet Ramage, Energy Systems and Sustainability “POWER FOR A SUSTAINABLE FUTURE”, Ed. Oxford University Press, p.6. (Godfrey Boyle)

⁷ *Ibidem*, p.23.

b) Indirectas

- Eólica
- Undimotriz

Fuentes no solares

a) Maremotriz

b) Geotérmica

1.5 Energía Geotérmica

La geotermia no es más que el calor interno de la Tierra. Este calor interno calienta las capas de agua más profundas: al ascender, el agua caliente o el vapor producen manifestaciones, como son los géiseres o las fuentes termales. Hoy en día, los progresos en los métodos de perforación y bombeo permiten explotar la energía geotérmica en numerosos lugares del mundo.

La Tierra posee una importante actividad geológica. Esta es la responsable de la topografía actual de nuestro mundo, desde la configuración de tierras altas y bajas (continentes y lechos de océanos) hasta la formación de montañas. Las manifestaciones más instantáneas de esta actividad son el vulcanismo y los fenómenos sísmicos. El núcleo de nuestro planeta es una esfera de magma a temperatura y presión muy elevadas. De hecho, el calor aumenta según se desciende hacia el centro de la Tierra: en bastantes pozos petrolíferos se llega a 100 grados centígrados a unos 4 kilómetros de profundidad. Pero no es necesario instalar larguísimos colectores para recoger una parte aprovechable de ese calor generado por la actividad geológica de la Tierra. Puede ser absorbido de colectores naturales, como por ejemplo géiseres o simples depósitos de aguas termales.

El modo más difundido, es la geotermia de baja energía, la cual es un tipo de geotermia que abarca una gama de temperaturas comprendidas entre 80°C y 150°C, en capas generalmente situadas entre 0 y 2.000 metros de profundidad. Estas temperaturas generalmente no permiten producir electricidad, pero sirven para balneología, calefacción de viviendas o instalaciones agrícolas.

1.6 Panorama Mundial de la Energía Geotérmica

La energía geotérmica ha crecido en los últimos años impulsada por diversos factores como el crecimiento económico, el precio de los combustibles fósiles y las grandes emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Debido a esto, muchos países se están dando cuenta de la importancia económica de sus recursos geotérmicos.

En el 2011 la energía geotérmica superó por más del doble en generación a la energía solar⁸. En mayo del 2012, en el mundo había aproximadamente 11,224 MW de capacidad instalada generada por recursos geotérmicos.⁹

Las nuevas tecnologías parecen estar aumentando la producción geotérmica, en algunas regiones se han tenido avances significativos en la producción utilizando ciclos binarios. Estas tecnologías permiten utilizar recursos geotérmicos de menor temperatura.

También, en países como Chile y Japón se están generando políticas que impulsen el crecimiento de la energía geotérmica en el mercado, mientras que el número uno en geotermia Estados Unidos parece estar rezagando debido a políticas inciertas.¹⁰ En la siguiente figura se puede observar la evolución en cuanto al aprovechamiento de la energía geotérmica en el mundo a lo largo de los años.

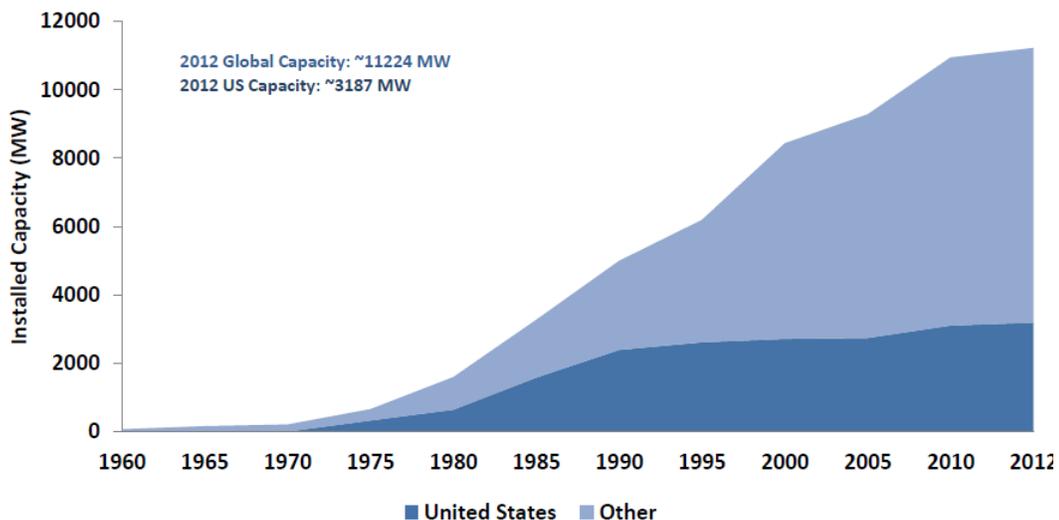


Figura 0-4 Capacidad Instalada Mundial de los años 1960 a 2012¹¹

⁸ Cortesía de US Energy Information Administration.

⁹ Geothermal Energy Association, *Geothermal: International Market Overview Report*, May 2012, p.3

¹⁰ *Ibidem*, p.3.

¹¹ *Ibidem*, p.23.

Es importante mencionar como en los últimos años el crecimiento global se ha dado en su mayoría a todos los países que están incursionando en la geotermia y no únicamente Estados Unidos.

1.7 Panorama Local de la Energía Geotérmica

Debido a su ubicación geológica, nuestro país tiene una gran actividad geotérmica. Debido a la unión de las placas de Norte América y del Pacífico un inmenso yacimiento de agua caliente se encuentra en Cerro Prieto, Baja California (645 MW). Una geología similar ocurre en Tres Virgenes, Baja California Sur (10 MW). En el cinturón volcánico central, donde la placa de Cocos y la de Norte América se unen se encuentran los campos geotérmicos de Los Azufres, Michoacán (192 MW) y Los Humeros, Puebla (40 MW)¹².

Actualmente existe el proyecto Cerritos Colorados, Jalisco el cual se encuentra en espera a ser terminado. México tiene alrededor de 1500 yacimientos de agua caliente a tal punto que un estado del país se llama Aguascalientes. Sin embargo, el 99.99% de la capacidad de usos directos en nuestro país está dedicada únicamente a la balneología¹³.

En la figura 1.5 se puede observar un mapa de la república mexicana en la que se pueden observar cómo está ubicado el país en relación con la actividad tectónica, lo cual ilustra claramente la actividad geotérmica del país. En el anexo 1 se muestra un mapa detallado de las temperaturas de los yacimientos en todo el país.

¹² <http://www.cfe.gob.mx> consultado el 21/01/2013

¹³ Luis C.A. Gutiérrez-Negrín, Raúl Maya-González and José Luis Quijano-León, Current Status of Goethermics in Mexico, Proceedings World Geothermal Congress, 2010, p.1.

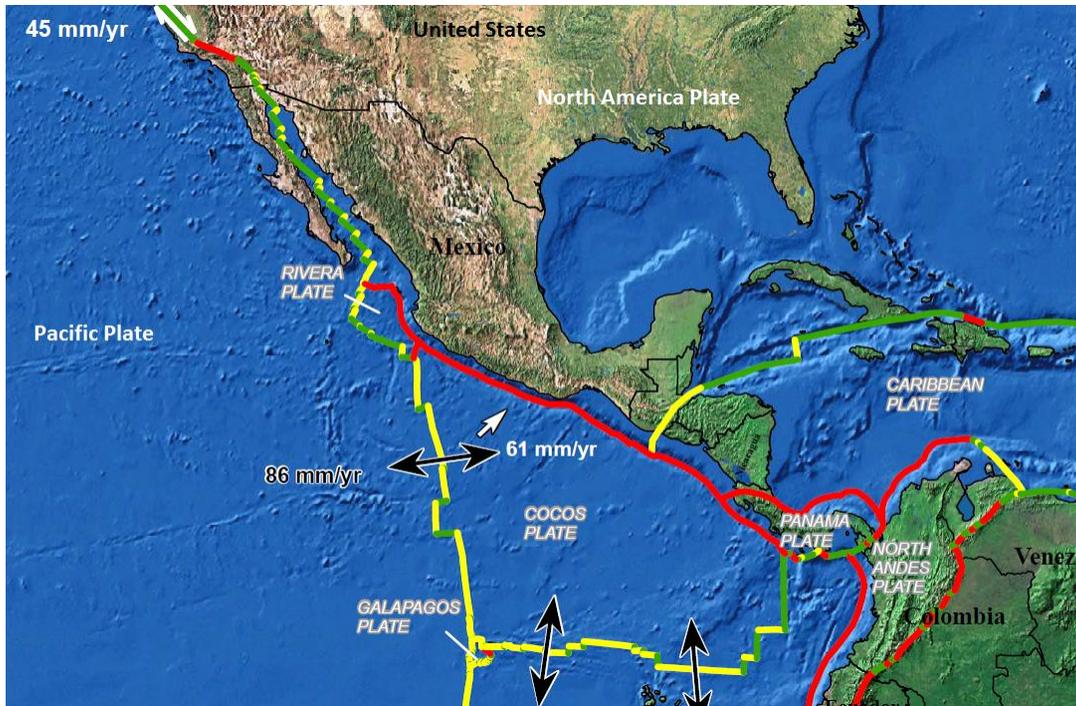


Figura 0-5 Mapa tectónico de la república mexicana¹⁴

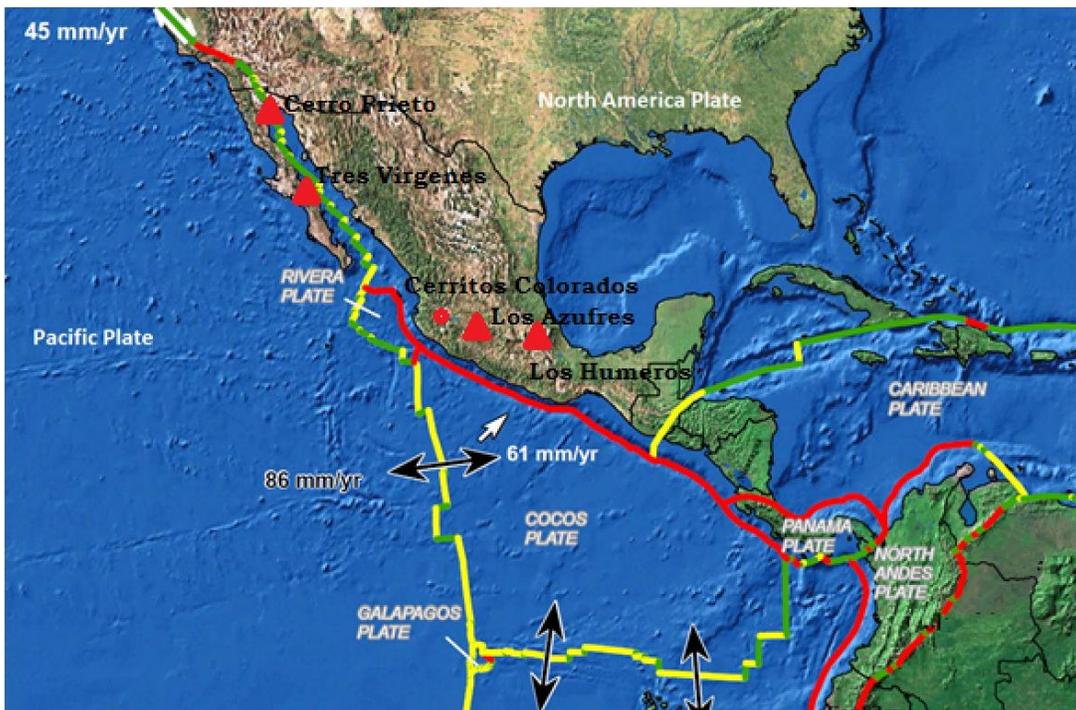


Figura 0-6 Centrales geotermoelectricas en la república mexicana¹⁵

¹⁴ Tectonics observatory CALTECH

¹⁵ *Ibidem*

La energía geotérmica en México es utilizada en su mayoría para producir electricidad debido a que los usos directos no se han implementado del todo como se habló anteriormente. Actualmente México es el cuarto país en generación de electricidad por este tipo de fuente con una Generación Total Geotermoeléctrica de alrededor de 886.6 MW

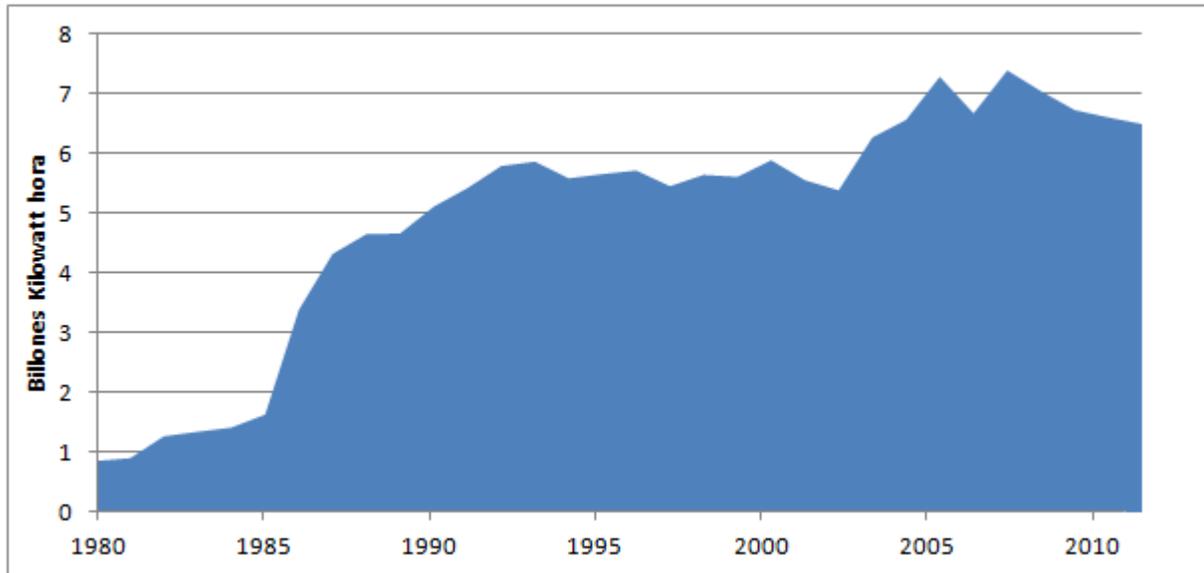


Figura 0-7 Evolución de la generación geotermoeléctrica en México (1980-2011)¹⁶

Sin embargo como observamos a continuación la generación eléctrica neta en el país no ha sido del todo estable a lo largo de los años pero si podemos observar un crecimiento notable con excepción de los últimos 4 años en los cuales la generación ha ido cayendo ligeramente.

1.8 Usos Directos de la Geotermia en México

Como se ha mencionado con anterioridad, los usos directos en nuestro país se limitan casi en su totalidad a la balneología. Sin embargo, existen algunos casos en los cuales se ha ido más allá de la balneología en nuestro país. Para comenzar enunciaremos los diferentes usos directos que se le han dado a la geotermia:

¹⁶ International Energy Statistics. Consultado el 21/03/2013

- a) Balneología. Este tipo de usos directos es el más común en varios lugares del planeta debido a su facilidad de implementación debido a que no representa una inversión fuerte, es el primer uso directo que se le dio a la geotermia históricamente.
- b) Calefacción y Aire Acondicionado. Es uno de los usos directos con más futuro, el cual en los últimos años se ha estado investigando. Generalmente se utiliza en países donde las temperaturas pueden variar en demasía entre verano e invierno.
- c) Calefacción de Vivienda Ecológica. También es parte del futuro de los usos directos de la geotermia pero todavía se encuentra en una etapa experimental como casi todas las aplicaciones de Vivienda Ecológica, son caras y difíciles de implementar en el día a día.
- d) Criado de animales. En algunos países se ha utilizado para acondicionar espacios de crianza animal.
- e) Secado de alimentos. Se ha utilizado en nuestro país y es uno de los más utilizados actualmente.
- f) Calor para Proceso Industrial. Es utilizado en algunas ocasiones, pero no es tan común debido a que generalmente las industrias no se encuentran contiguas a los yacimientos geotérmicos.
- g) Derretir o descongelar. En países donde las temperaturas en el invierno son considerablemente bajas se ha utilizado, Japón es uno de los países donde más se ha investigado este uso directo de la geotermia.
- h) Otros. En nuestro país existen también algunos proyectos piloto desarrollados por la CFE. Dichos proyectos fueron implementados en los campos geotérmicos de Cerro Prieto, Los Azufres y Los Humeros. Estos proyectos incluyen: calefacción de oficinas, invernaderos para apoyar las labores de reforestación, secado de frutas y verduras, germinados de bulbos, producción acelerada de flores, criadero de hongos comestibles y secado de madera. ¹⁷

A continuación se mostrará una tabla donde se ilustran los usos directos en México hasta el 31 de Diciembre del 2009.

¹⁷ Historia de la Geotermia. Temas Selectos de Termofluidos. M. en I. Héctor Aviña Jiménez. 12/02/2012

Tabla 0-2 Los Usos Directos de la Geotermia en México¹⁸

Uso	Capacidad instalada	Uso Anual de Energía
	(MWt)	(TJ/año)
Calefacción	0.46	4.397
Calentamiento Distrital	0	0
Aire Acondicionado	0	0
Vivienda Ecológica	0.004	0.059
Criadero Animal	0	0
Secado de Alimentos	0.007	0.101
Proceso Industrial	0	0
Derretir Nieve	0	0
Balneología	155.347	4,018.23
Bombas de Calor	0	0
Total	155.819	4,022.79

1.9 Conclusiones

Con todo esto, y conociendo la prospectiva eléctrica del sector eléctrico para el 2024 se puede decir que queda mucho por hacer en México en lo que respecta a la energía geotérmica y las demás energías renovables.

Es importante mencionar que los usos directos en el país tienen un gran potencial y no están siendo explotados correctamente. A pesar de tener tantos recursos únicamente un 0.01% no es utilizado en la balneología.

Las Bombas de Calor Geotérmicas (BCG) son una gran área de oportunidad en nuestro país que está siendo desaprovechada. En el siguiente capítulo se hablara más a detalle sobre las bombas de calor, sus ventajas y desventajas así como su funcionamiento a detalle.

¹⁸ Summary table of geothermal direct uses. Geocónsul. Luis C.A. Gutiérrez-Negrín. April 2010

2 Bombas de Calor Geotérmicas

2.1 Introducción.

En este capítulo se darán las generalidades de uso alrededor del mundo, las diferentes configuraciones que existen, el principio de funcionamiento de las bombas de calor geotérmicas y un análisis de cuáles son las ventajas y desventajas de estas. Sin embargo, más adelante se hará énfasis en las configuraciones avanzadas y principio de funcionamiento.

2.2 Antecedentes

Hasta mediados del siglo XIX la ventilación y el almacenamiento de hielo era la única forma de enfriar edificios. En 1853, Sir William Thomson, Lord Kelvin describió en su artículo “The Power Required for Thermodynamic Heating of Building” el uso de una bomba de calor movida por un motor y demostró su mayor eficiencia respecto a la de una combustión.¹⁹

Una bomba de calor convencional²⁰ es una máquina térmica que opera como un refrigerador: la diferencia únicamente radica en que el refrigerador se utiliza esencialmente para enfriar un espacio o fluido, mientras que la bomba de calor puede utilizarse para enfriamiento o calefacción.²¹

Una bomba de calor convencional consta de cuatro partes principales: un condensador, un compresor, un evaporador y una válvula de expansión. Y tiene dos descargas las cuales generalmente son llamadas sumidero de calor y el espacio acondicionado. La dirección de los flujos y las temperaturas de los depósitos dependerán del proceso deseado, ya sea refrigeración o calefacción.

A continuación, en la figura 1.8 se muestra un esquema de una bomba de calor con todos sus componentes básicos. Más adelante se mostraran las configuraciones específicas para enfriamiento y calefacción.

¹⁹ Heat pump technology, Hans Ludwig con Cube, Fritz Steimle, E.G.A Goodall, Butterworths, 1981.

²⁰ Bomba de calor convencional se refiere a una bomba de calor por compresión mecánica, en el capítulo 4 se hablará mas a detalle de esto.

²¹ Estado actual de desarrollo de las Bombas de Calor Geotérmico, Revista Mexicana de Geoenergía, Volumen 25, No.2. *Alfonso García Gutiérrez e Ignacio Martínez Estrella.*

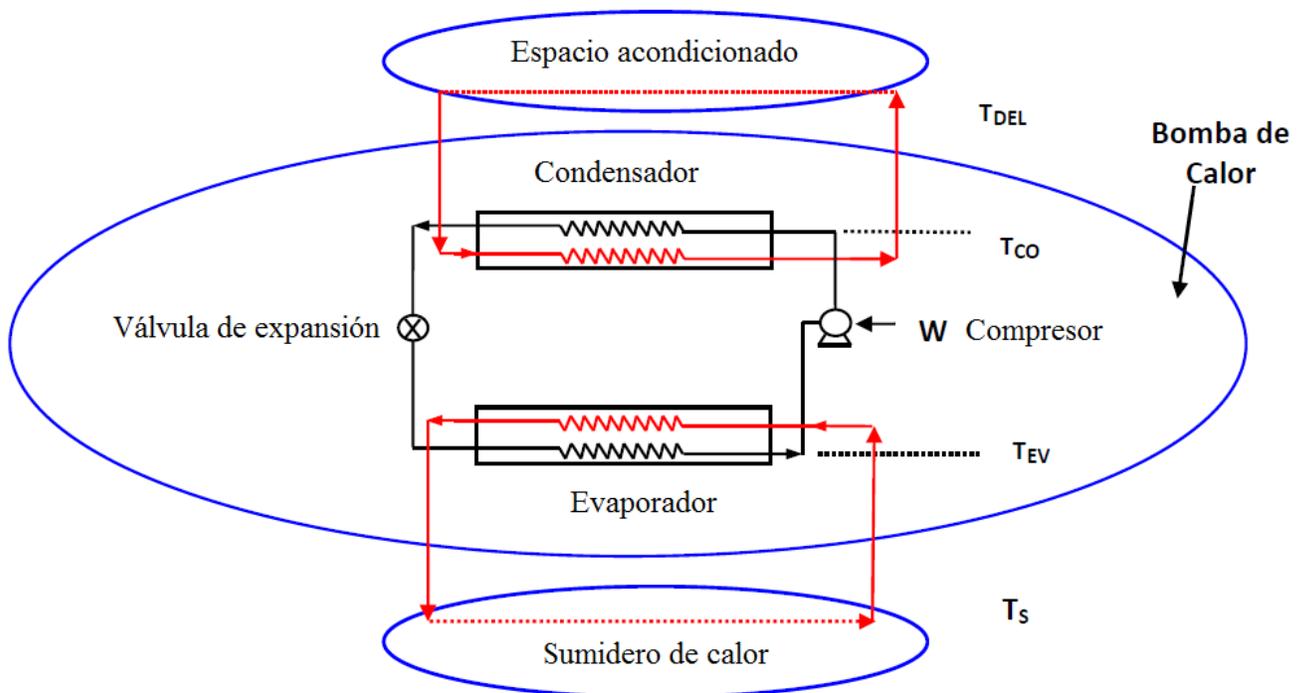


Figura 2-1 Diagrama esquemático de una bomba de calor.²²

Como se puede observar las bombas de calor básicamente son un sistema de cuatro componentes. La fuente o sumidero de calor puede ser aire, agua o el subsuelo. Cuando la fuente o sumidero de calor es el subsuelo el sistema tiene el nombre de Bomba de Calor Geotérmica (BCG ó GHP por sus siglas en inglés).

2.3 Bombas de calor geotérmicas

Como se mencionó con anterioridad, cuando una bomba de calor tiene como fuente o sumidero el subsuelo, se le denomina bomba de calor geotérmica. Hoy en día las BCG representan una alternativa a los costos económicos y ambientales que representan los combustibles fósiles. Lo que se busca al utilizar esta tecnología son tres cosas principalmente:

- a) Disminuir la demanda energética. Esto, debido a que los equipos convencionales de aire acondicionado y calefacción tienen una mayor demanda energética.
- b) Reducir los impactos ambientales. Como se ha mencionado, al utilizar una menor cantidad de energía en el proceso, se reducen la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera ya sea directa o indirectamente.

²² *Ibidem*, (adaptación).

- c) Mantener condiciones confortables. Debido a que la fuente o sumidero de calor es constante durante largos periodos de tiempo se pueden mantener las demandas de confort del cliente.

Bajo este contexto, las BCG representan una alternativa interesante a los sistemas convencionales debido a que es una tecnología con un costo competitivo. A pesar de que para las BCG los costos iniciales son mayores que de otros sistemas de acondicionamiento, los costos de mantenimiento y operación son muy bajos en comparación con los sistemas que normalmente se usan para acondicionar.

Las BCG son una tecnología madura utilizada en muchos países alrededor del mundo, sin embargo en algunos países como México se ha desechado esta tecnología debido a su alto costo inicial.

2.4 Panorama General de las Bombas de Calor Geotérmicas

Actualmente, las BCG representan el uso directo de la energía geotérmica con mayor capacidad instalada en el mundo. A continuación se puede observar una tabla sobre los usos directos de la energía geotérmica alrededor del mundo.

Tabla 2-1 Usos directos en el mundo 1995-2010²³

	1995	2000	2005	2010
Bombas de Calor Geotérmicas	1,854	5,275	15,384	35,236
Calefacción	2,579	3,263	4,366	5,391
Casas Ecológicas	1,085	1,246	1,404	1,544
Acuicultura	1,097	605	616	653
Secado de Alimentos	67	74	157	127
Usos Industriales	544	474	484	533
Balneología	1,085	3,957	5,401	6,689
Derretimiento de Nieve	115	114	371	368
Otros	238	137	86	41
Total	8,664	15,145	28,269	50,583

²³ Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review, Proceedings World Geothermal Congress. John W. Lund, Derek H. Freeston, Tonya L. Boyd.. 2010.

Hoy en día hay varios países que están a la vanguardia en lo que respecta a las BCG como lo son Estados Unidos, España, Francia, Japón, Alemania, entre otros. En el anexo 2 se muestra a detalle los usos de las bombas de calor geotérmicas en el mundo. Las instalaciones con más renombre hasta el 2012 según García Gutiérrez y Martínez Estrella²⁴ son:

a) Galt House East Hotel de Louisville, Kentucky, EUA

Este sistema representa la aplicación más grande de BCG en EUA. Proporciona A/C y calefacción para 600 cuartos de hotel, 100 departamentos y 89,000 m² de oficinas con un total de 161,650 m². El sistema opera con 177 litros por segundo (l/s) de agua a 14°C de 4 pozos; su capacidad es de 15.8 MW para enfriamiento y 19.6 MW para calefacción, y sus ahorros de energía son de 53% comparado con un edificio similar sin BCG, y permite ahorros por 25 mil dólares mensuales (datos de 2007).

b) Estación Pacífico del metro de Madrid

En esta estación funciona un sistema de BCG para climatizar 1090 m² (A/C y calefacción) de los andenes de la línea 1 del metro madrileño, los cuartos técnicos y los locales comerciales. La inversión fue de 700,000 €, y permite ahorros de energía de 50 a 75% y una reducción de 50% en las emisiones de CO₂.

c) Centro de control aéreo del aeropuerto de Frankfurt, Alemania

Este centro tiene 57,800 m² de espacio donde laboran 1200 empleados. Su sistema de BCG consiste de 154 pozos divididos en 2 campos de pozos de 70 m de profundidad con una temperatura de 4°C, y su capacidad es de 340 kW para A/C y 330 kW para calefacción. Las BCG se usan para calefacción, mientras que el agua del subsuelo se usa directamente del pozo para enfriamiento. Las demandas pico se complementan con otras fuentes de energía. El sistema tiene ahorros por concepto de energía de 200,000 USD/año (cifras de 2007).

d) South Cariboo Recreation Centre 100 Mile House, de Columbia Británica, Canadá

²⁴ Revista Geotérmica Mexicana, *Op. cit.*

Los centros recreativos son el eje de las actividades comunitarias en Canadá, y usualmente la pista de hockey es el corazón del centro. Esta aplicación en particular tiene bombas de calor para: (a) refrigerar la pista de patinaje; (b) proporcionar des-humidificación, A/C y calefacción del área “helada” del espectáculo (el estadio o gimnasio), (c) calentar parte del edificio y los asientos de las gradas mediante pisos radiantes; (d) proporcionar agua caliente para las regaderas y para inundar la pista de hielo; (e) almacenar energía. Todos los sistemas se integran mediante un circuito en tierra. El sistema tiene 5,241 m² de área y su capacidad es de 310 kW para refrigeración, 174 kW para climatización (humedad, enfriamiento y calentamiento) y 84 kW para A/C y calefacción de oficinas, lobby, vestidores, etc.

e) Ball State University, de Muncie, Indiana, EUA

Esta aplicación está en construcción y su capacidad estimada es de 5 mil toneladas para enfriamiento, A/C y calefacción. La instalación consta de más de 40 edificios, dos áreas con 4000 pozos de 122 m de profundidad, tiene un costo total estimado de \$65-70 millones USD y permitirá ahorros operacionales por 2 millones de USD/año. Asimismo, reducirá las emisiones de gases de invernadero en un 50%, equivalentes a 80 mil toneladas de carbón al año.

2.5 Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de las bombas de calor geotérmicas se basa en que a lo largo del año, la temperatura del subsuelo permanece casi constante. A mayor profundidad la fluctuación de temperaturas se atenúa considerablemente hasta el punto de poder ser considerada constante. En la siguiente gráfica, se puede observar como varía la temperatura del subsuelo dependiendo de la profundidad y del día del año.

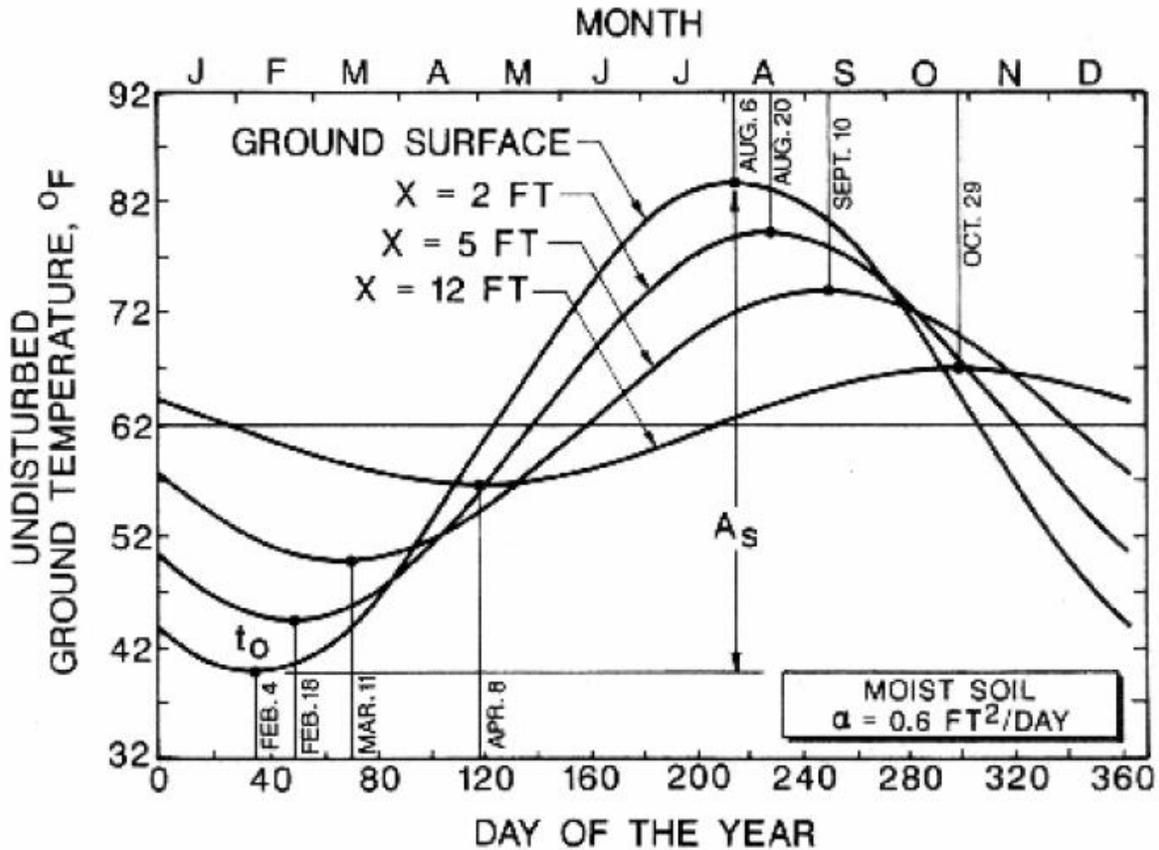


Figura 2-2 Variación de la temperatura del subsuelo con respecto a la distancia y el día del año²⁵

Debido a esto, a una cierta profundidad de la superficie, es posible acondicionar la temperatura ambiente, trasladando la carga térmica del aire al subsuelo durante el verano y trasladando la carga térmica del subsuelo al aire durante el invierno.

Como se mencionó con anterioridad, todo esto se logra gracias a la ayuda de una bomba de calor. Dependiendo de si lo que se desea es enfriamiento o calefacción, la configuración de la bomba de calor geotérmica cambiará.

A continuación se mostrará más a detalle las dos configuraciones de bomba de calor (enfriamiento y calefacción).

²⁵ Condiciones de confort a partir del intercambio térmico con el suelo, Asociación Geotérmica Mexicana, Ing. Raúl Sánchez Velasco

2.5.1 Enfriamiento

Cuando se desea transferir la carga térmica del aire al subsuelo la configuración de la bomba de calor será la siguiente.

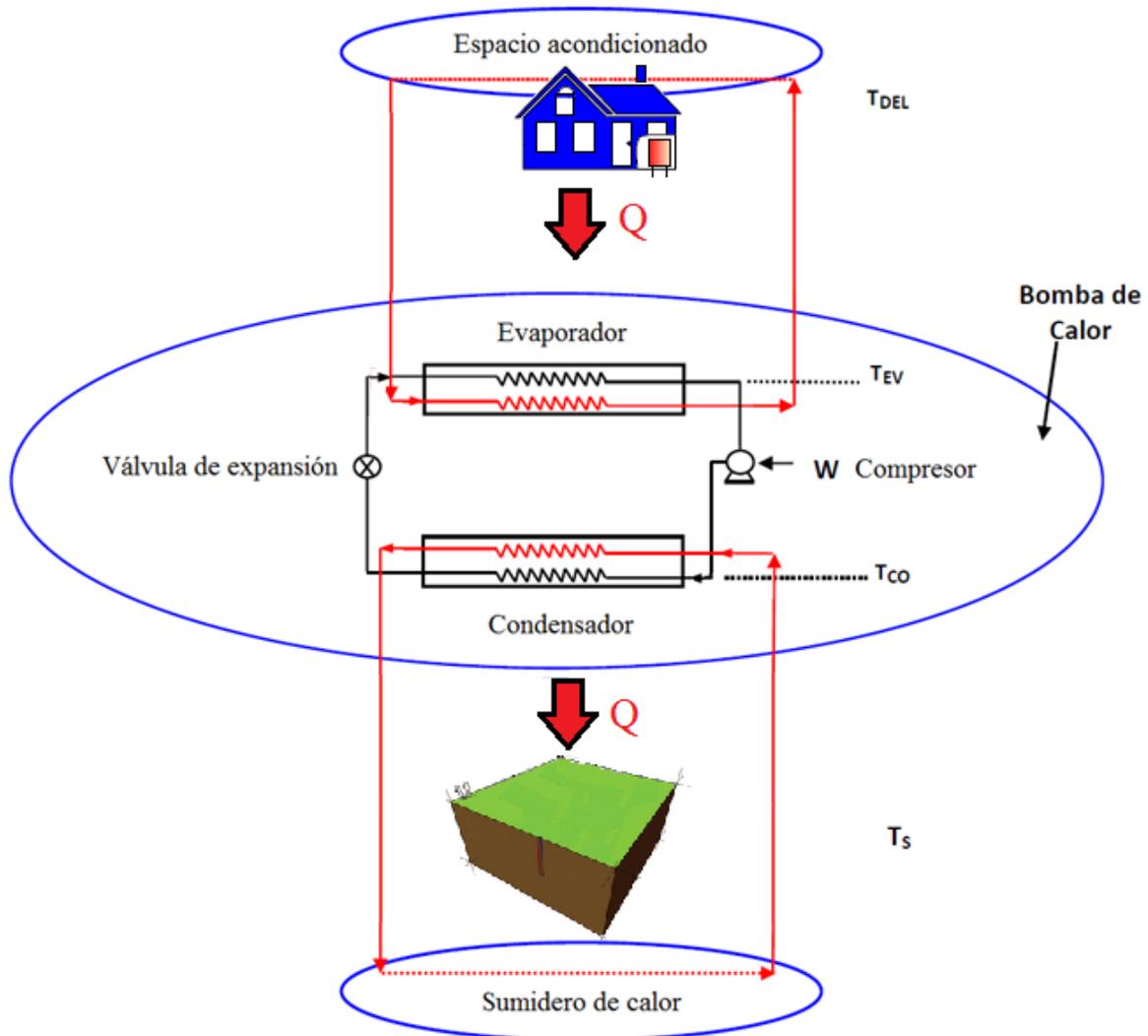


Figura 2-3 Configuración de Bomba de Calor para enfriamiento

En el evaporador, el fluido de trabajo (negro) utiliza la carga térmica del aire para evaporarse. Mientras que, en el condensador, el fluido de trabajo le transfiere la carga térmica al sumidero de calor (en este caso el subsuelo).

2.5.2 Calefacción

Cuando se desea transferir la carga térmica del subsuelo al aire la configuración de la bomba de calor será la siguiente.

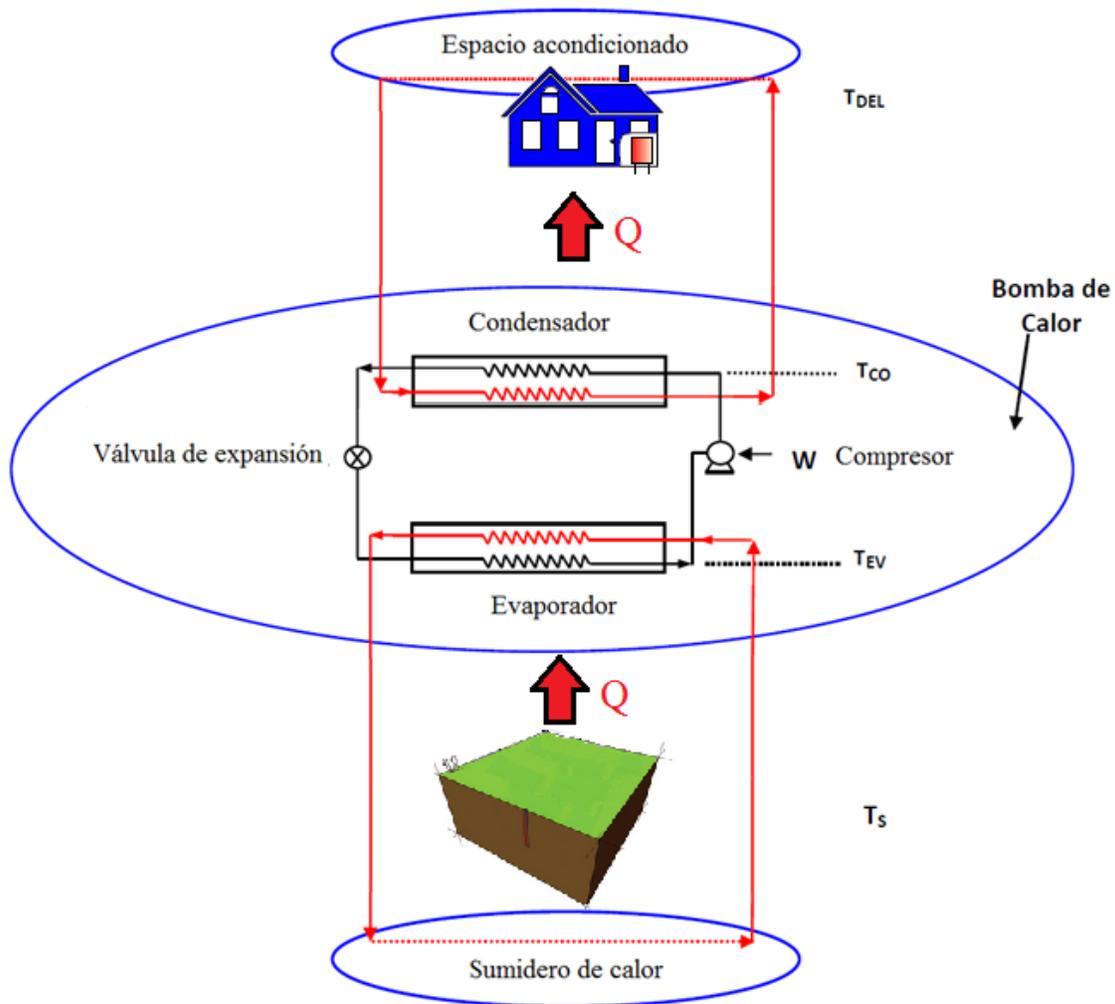


Figura 2-4 Configuración de bomba de calor para calefacción

En el condensador, el fluido del trabajo (negro) le transfiere la carga térmica del suelo al aire del espacio acondicionado. Mientras que, en el evaporador, el fluido de trabajo toma la carga térmica del sumidero de calor (en este caso el subsuelo).

2.6 Tipos de bombas de calor (geotérmicas configuraciones)

Las bombas de calor conectadas al subsuelo se clasifican en tres grandes ramas²⁶: Conectadas al subsuelo, acopladas a una fuente subterránea de agua y acopladas a una fuente superficial de agua como pueden ser ciertos cuerpos de agua como el mar, un río o un lago. A continuación se dará una descripción de cada una de estas, sin embargo para términos de este trabajo, únicamente nos enfocaremos en las bombas de calor acopladas a la tierra.

Bombas de calor conectadas al subsuelo. Son aquellas que, como su nombre lo dice, están conectadas directamente al subsuelo a una específica distancia de la superficie y que tienen tres principales configuraciones, vertical, horizontal y de expansión directa.

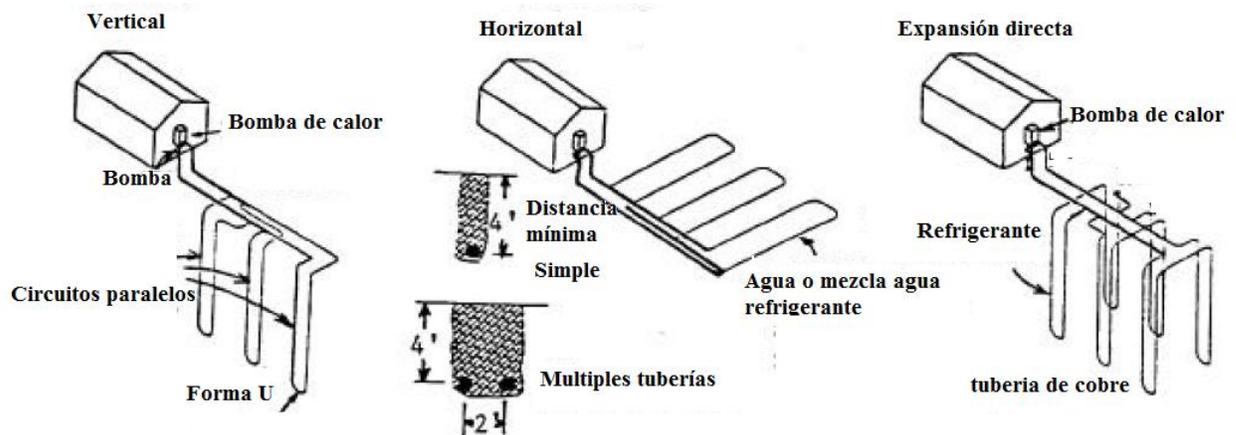


Figura 2-5 Bombas de calor conectadas al subsuelo²⁷

Bombas de calor con fuente subterránea de agua. Son aquellas que utilizan una fuente de agua del subsuelo, cabe mencionar que esta fuente puede ser afectada o no por una manifestación geotérmica. Las tres principales configuraciones de las bombas de calor con fuente subterránea de agua son de un pozo, de pozo doble o alguna combinación de las anteriores con descarga en un acuífero.

²⁶ GROUND-COUPLING WITH WATER SOURCE HEAT PUMPS, The University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama, Steve Kavanaugh.

²⁷ *Ibidem*, (adaptación).

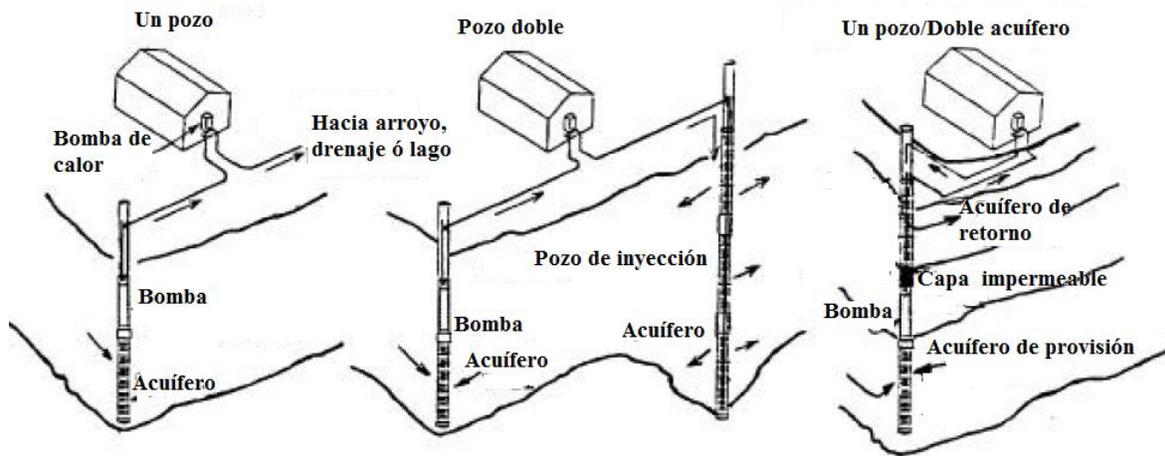


Figura 2-6 Bombas de calor con fuente subterránea de agua

Bombas de calor acopladas a una fuente superficial de agua. Como su nombre lo dice son aquellas que están conectadas a un acuífero ya sea un lago, el mar o un río. Se clasifican en circuito cerrado, circuito abierto y enfriamiento directo.

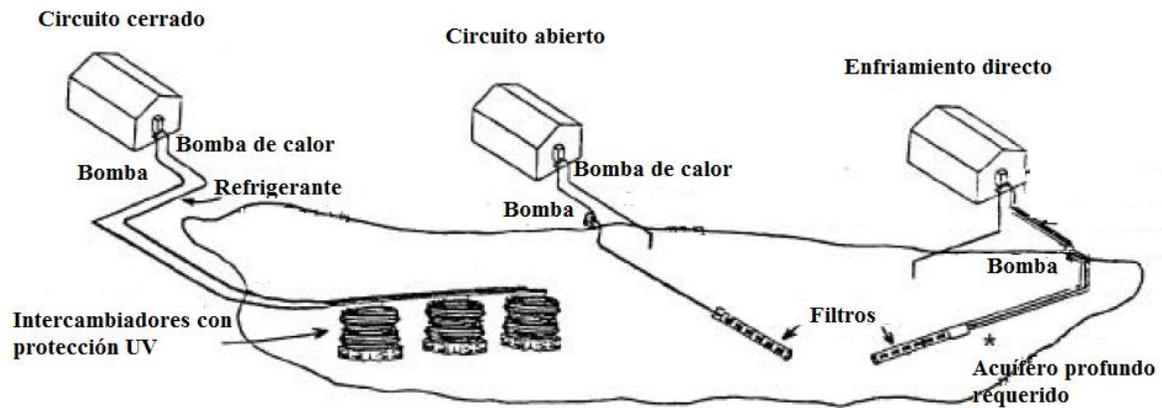


Figura 2-7 Bombas de calor acopladas a una fuente superficial de agua

2.7 Ventajas y desventajas

En lo que respecta a las BCG hay una gran cantidad de variables a considerar. Sin embargo, estas variables se verán a mayor detalle en los apartados "configuración a detalles de las bombas de

calor” y “optimización de las bombas de calor”. Debido a esta gran cantidad de variables a considerar, los valores de rendimiento de las bombas de calor geotérmicas varían de gran manera.

De igual forma los materiales utilizados para construir las bombas de calor geotérmicas van a depender de la naturaleza del suelo, de la carga térmica y de los fluidos con los que se trabajará. Por esto, una desventaja de las BCG es la dificultad de medir y predecir todos los factores que alteran el rendimiento de estas.

La eficiencia de una bomba de calor por compresión mecánica se mide con un parámetro llamado COP²⁸ (por sus siglas en inglés Coefficient of Performance). Este parámetro es muy importante debido a que nos dice cuantas unidades de energía térmica se alimentaran por cada unidad de energía alimentada.

Los valores típicos del COP de las BCG son de 3.5, aunque se han reportado valores de hasta 10²⁹. Esto quiere decir que por cada unidad de energía alimentada (usualmente electricidad) se entregan 3.5 unidades de energía térmica, de las cuales 2.5 (71%) son de energía geotérmica la cual es esencialmente gratis³⁰.

Por estas mismas razones las BCG son realmente una buena opción en lo que respecta a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero debido a que el acondicionamiento de espacios se da alrededor de todo el mundo ya sea para calentar o enfriar (comercial, pública y domésticamente).

Sin embargo, la mayor desventaja de las BCG es el gran costo inicial del proyecto. Esto se debe a que se tiene que realizar perforaciones para instalar el equipo a cierta distancia de la superficie. Esto representa uno de los mayores costos de todo el proyecto. Si las condiciones y naturaleza del subsuelo y/o de los acuíferos son agresivas para los materiales, otro gran costo son los materiales de las BCG debido a que deben ser capaces de resistir condiciones corrosivas a lo largo de su periodo de vida.

²⁸ El término COP se desglosará a detalle en el capítulo 3

²⁹ Revista Geotérmica Mexicana, *Op. cit.*

³⁰ Gratis en el sentido que es una fuente de calor prácticamente constante que no requiere de la utilización de combustibles como es el caso de la mayoría de los sistemas de acondicionamiento.

Estas desventajas son las principales que evitan el desarrollo de las BCG en ciertos países como México donde una fuerte inversión inicial carece de aceptación a pesar de que tenga un buen periodo de recuperación (como es el caso de las BCG³¹).

3 Análisis técnico de las bombas de calor

3.1 Introducción

Las bombas de calor tienen una gran variedad de componentes, sin embargo –como se mostró con anterioridad- los cuatro principales componentes son el compresor, la válvula reversible y dos intercambiadores de calor: un condensador y un evaporador. El conocer a detalle estos componentes es indispensable para el diseño de las bombas de calor. En las bombas de calor convencionales generalmente se utiliza un refrigerante como fluido de trabajo debido a que se pueden escoger diferentes refrigerantes con distintos puntos de ebullición, todo esto, dependiendo de la aplicación deseada. A continuación se hablará más a detalle de los cuatro procesos que son indispensables en el ciclo de una bomba de calor: compresión, condensación, expansión y evaporación.

3.2 Equipos principales de las bombas de calor.

3.2.1 Compresor

Dentro del compresor se lleva a cabo el proceso de compresión del fluido de trabajo. El compresor hace circular el refrigerante por todo el sistema. En las bombas de calor geotérmicas el compresor es de vital importancia para muchos parámetros de diseño y desempeño debido a que es el único componente que utiliza un recurso secundario³² (en este caso electricidad), por lo que los gastos van directamente ligados al desempeño y la carga del compresor. Esto es de vital importancia en lo que respecta a las bombas de calor geotérmicas debido a que va a determinar las dimensiones del equipo y por lo tanto su precio.

En la figura 3-1. Se puede observar el proceso de compresión del refrigerante que se da a cabo en el ciclo de una bomba de calor geotérmica.

³¹ Estos se debe a que los costos de operación son mucho menores que los de un sistema convencional de acondicionamiento.

³² Aquellos recursos que llevan un proceso de conversión energética

Como se puede observar, en las bombas de calor, el compresor está encargado de elevar la presión del refrigerante a tal punto que este es sobrecalentado hasta una presión deseada, en el caso ideal este proceso se da a entropía constante.

El compresor es esencial para el ciclo debido a que la presión de salida estará directamente relacionada con la temperatura que se desea tener en el espacio acondicionado. Los compresores que son utilizados en las bombas de calor, generalmente son recíprocos³³ debido a que son fáciles de construir y a sus altas relaciones de compresión.

El ciclo teórico de trabajo de un compresor ideal se entiende fácilmente mediante el estudio de un compresor monofásico de pistón funcionando sin pérdidas y que el gas comprimido sea perfecto.

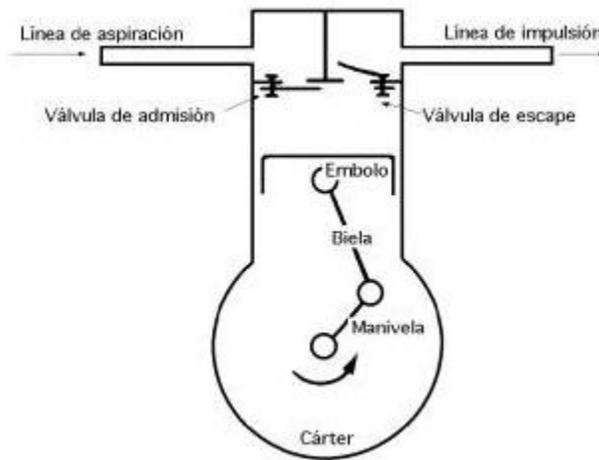


Figura 3-1 Esquema básico de compresor monofásico

Uno de los conceptos más importantes en lo que respecta a la eficiencia de los compresores es el espacio muerto. Este se puede definir como el volumen ocupado por el refrigerante en el compresor que no es desplazado por el miembro móvil.

En el caso de los compresores recíprocos, el espacio muerto se puede considerar como el volumen residual entre el pistón y el fondo del cilindro. Esto provoca un retraso en la aspiración debido a que el aire almacenado en el volumen residual se encuentra a la presión de salida y debe expandirse hasta la presión inicial antes de permitir la entrada de aire en el cilindro. A continuación se puede observar la diferencia entre el ciclo con espacio muerto nulo y con espacio muerto real.

³³ Heat Pump Technology, Langley, Billy C. Ed. Prentice-Hall

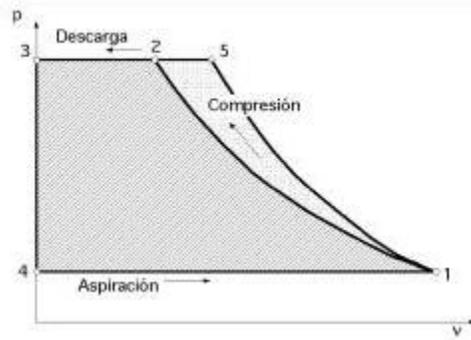


Figura 3-2 Ciclo ideal de un compresor sin espacio muerto

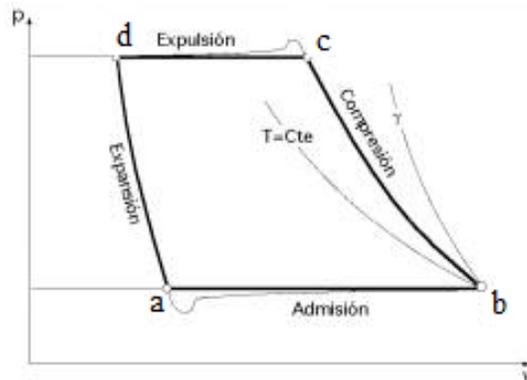


Figura 3-3 Ciclo ideal de un compresor con espacio muerto

La eficiencia volumétrica es un concepto creado para medir la eficiencia de los compresores recíprocos. Esta es una relación entre la masa que entra realmente al pistón y la masa que teóricamente debería entrar en cada ciclo. La eficiencia volumétrica (η_v) está dada por:

$$\eta_v = \frac{V_c - V_d}{V_a - V_c} = 1 + C - C \left(\frac{v_1}{v_2} \right) \quad (3.1)$$

Dónde

$$C = \frac{V_d}{V_b - V_d} = \text{Relación del espacio muerto} \quad (3.2)$$

v_1 = Volumen específico del refrigerante al inicio de la compresión

v_2 = Volumen específico del refrigerante al terminar la compresión

La eficiencia volumétrica es una medida de que tanto del desplazamiento del pistón del compresor es utilizado para desplazar el refrigerante a través del ciclo. Es por esto que la elección correcta del

refrigerante es uno de los factores más importantes a considerar en el diseño de las bombas de calor geotérmicas.

Para un caso ideal en el cual no ocurren cambios termodinámicos en la admisión y la expulsión, la eficiencia volumétrica se define como la masa de vapor realmente bombeada por el compresor entre la masa de vapor que el compresor hubiera bombeado si pudiera manejar un volumen de vapor igual al de la carrera del pistón.

$$\eta_V = \frac{V_b - V_a}{V_b - V_d} \left(\frac{v_1}{v_2} \right) \quad (3.3)$$

Y sabemos que

$$V_b - V_a = (V_b - V_d) - (V_a - V_d) \quad (3.4)$$

$$V_a = V_d \left(\frac{P_d}{P_a} \right)^{\frac{1}{n}} = V_d \left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.5)$$

Y de la ecuación (3.2) sabemos que:

$$C = \frac{V_d}{V_b - V_d}$$

Entonces

$$\frac{V_b - V_a}{V_b - V_d} = 1 + C - C \left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.6)$$

Y finalmente

$$\eta_V = \left[1 + C - C \left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \frac{v_1}{v_2} \quad (3.7)$$

Se llegó a esta relación debido a que los tres parámetros de diseño más importantes de un compresor recíprocante: la re expansión del vapor en el espacio muerto, la pérdida de presión en las válvulas de admisión y expulsión y por último la expansión volumétrica del refrigerante debido al calentamiento en el proceso de compresión.

3.2.2 Válvula de expansión

Aquí se lleva a cabo el proceso de expansión del refrigerante de una bomba de calor. La válvula de expansión va a ser la encargada de iniciar el proceso de evaporación del refrigerante a la salida del condensador. Todo este proceso se lleva a cabo mediante un cambio brusco de área, al disminuir la presión del refrigerante se logra iniciar el proceso de evaporación al llevar la presión del refrigerante por debajo de la presión de saturación del mismo.

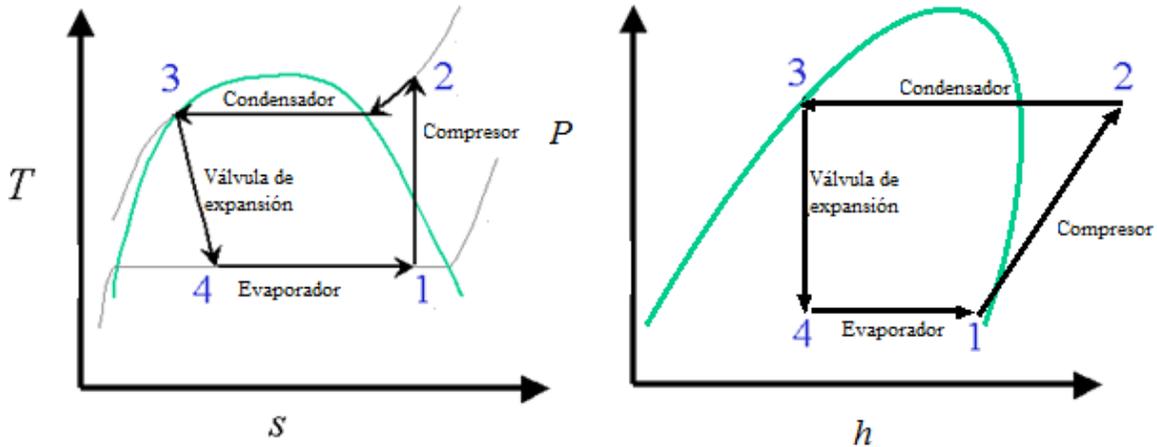


Figura 3-4 Diagrama T-s y P-h de bomba de calor simple

Como se observa en la figura 3.5 estos procesos se dan a entalpía constante. El dimensionamiento de la válvula de expansión de las bombas de calor geotérmicas va a depender totalmente de las condiciones del sumidero de calor. Esto quiere decir que dependiendo de la profundidad – directamente relacionada con la temperatura del suelo- nuestro dimensionamiento cambiara y por lo tanto las especificaciones de la válvula de expansión. Esto debido a que dependiendo la temperatura del sumidero, la presión para iniciar la evaporación va a cambiar.

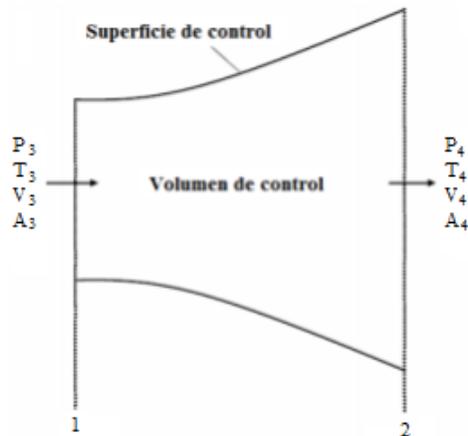


Figura 3-5 Volumen de control para válvula de expansión

Las propiedades del fluido a lo largo de un proceso de expansión isentrópica pueden relacionarse con sus propiedades de estancamiento o reposo, denotadas por un subíndice 0 , por medio de las siguientes expresiones:

Presión:

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.10)$$

Temperatura:

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \quad (2.11)$$

Densidad:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

3.2.3 Intercambiadores de calor

En el esquema básico de las bombas de calor convencionales existen dos intercambiadores de calor: el condensador y el evaporador. Como su nombre lo dice en estos intercambiadores se dan los procesos de condensación y evaporación respectivamente de las bombas de calor. Estos dos intercambiadores son esenciales en lo que respecta al ciclo debido a que son los que están en contacto con el espacio acondicionado y el sumidero de calor. Es decir, las temperaturas a las que trabajara la bomba de calor serán proporcionadas por los intercambiadores de calor.

Un intercambiador de calor está conformado por elementos que transfieren el calor como la matriz; conteniendo a las llamadas superficies de transferencia de calor, los elementos de distribución de los fluidos (cabezales o tanques), tubos o boquillas de entradas y salidas, etc.

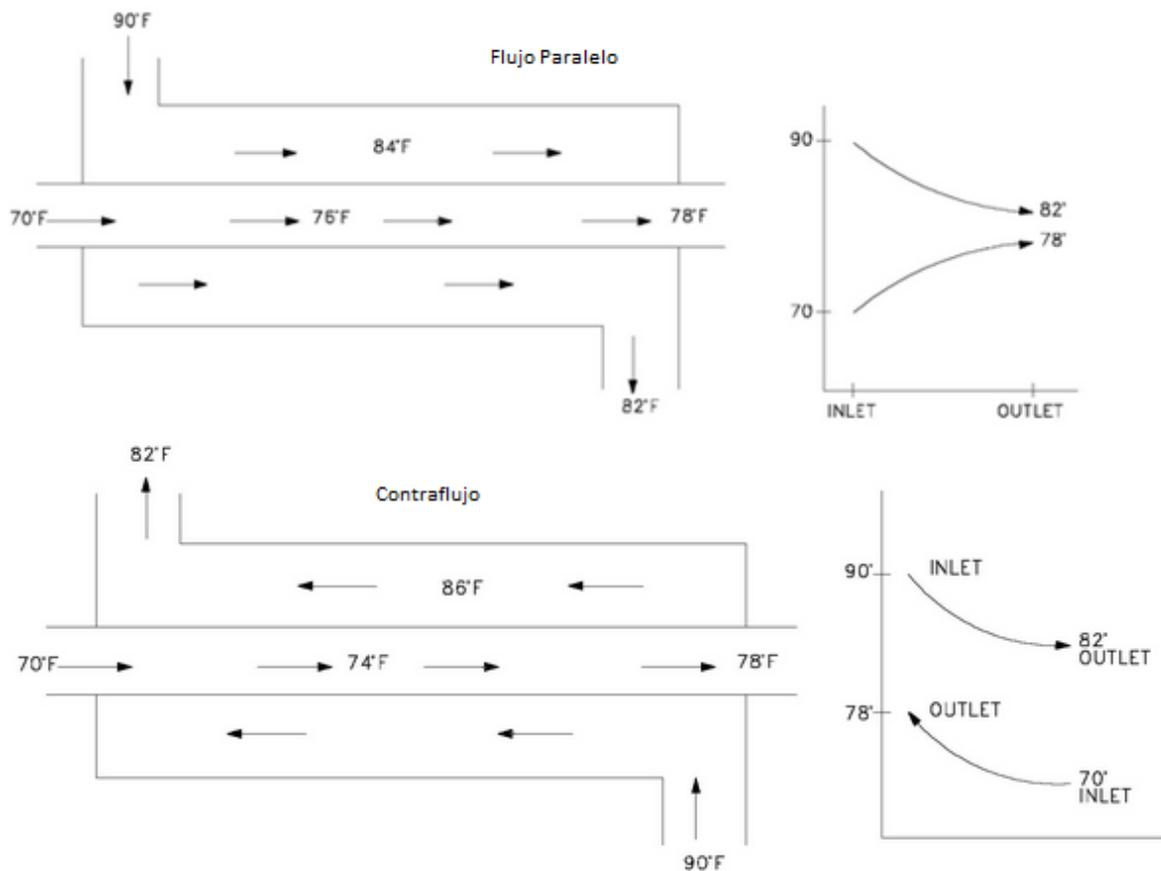
Para poder seleccionar un tipo de intercambiador de calor el diseñador debe tomar en cuenta que hay muchas alternativas, pero que sólo una es la más adecuada para un proceso específico. La selección de intercambiadores de calor tiene una inmensidad de criterios pero los más importantes son los fluidos que se van a manejar, las presiones y temperaturas de operación así como la carga térmica y el costo.

Los fluidos de trabajo de la bomba de calor cederán o recibirán energía térmica dentro de los intercambiadores. Es por esto que, un dimensionamiento adecuado de los intercambiadores de

calor (ya sea el condensador o el evaporador) en las bombas de calor geotérmicas es de vital importancia para la correcta operación de estas.

En la figura. 312312 se observa que ambos procesos en el caso ideal se dan a presión y temperatura constante ya que se mueven dentro de la campana de saturación. Sin embargo, se sabe que este no es el caso debido a que estos equipos no son eficientes en su totalidad. Debido a que las temperaturas de sumidero y de espacio acondicionado determinan la eficiencia total de la bomba de calor es de vital importancia tomar ciertas consideraciones para que estos equipos sean lo más eficientes posibles.

La configuración básica de flujos en un intercambiador de calor es: Flujo paralelo, contraflujo y flujo cruzado. La elección de una configuración particular depende de la efectividad del intercambiador requerida, el arreglo, los esfuerzos térmicos permisibles, la temperatura y algunos otros criterios de diseño.



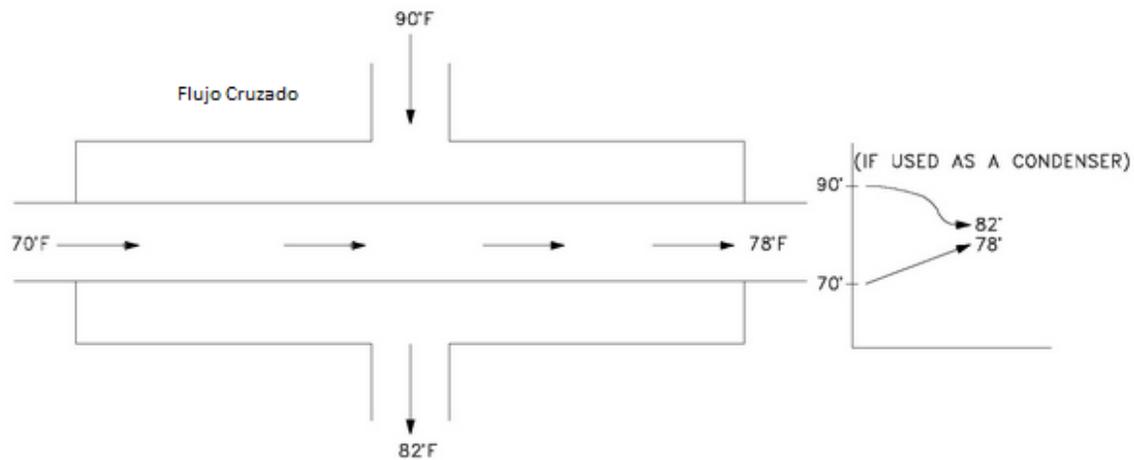


Figura 3-6 Configuraciones de flujos en intercambiadores de calor³⁴

A continuación se enuncian los requerimientos generales que debe cumplir un intercambiador de calor:

1. Alta eficiencia térmica
2. Bajas pérdidas de presión
3. Confiabilidad y expectativa de vida
4. Alta calidad del producto y fácil operación
5. Compatibilidad del material con el proceso
6. Buen tamaño, fácil de instalar y de buen uso
7. Fácil mantenimiento
8. Ligero pero fuertemente construido para soportar presiones de operación
9. Fácil de manufacturar
10. Bajo costo

Cuando el calor es intercambiado entre dos fluidos que circulan constantemente por un intercambiador de calor, la transferencia de calor generalmente se calcula utilizando la siguiente ecuación.

$$q = UA\Delta t_m$$

Dónde

U es el coeficiente global de transferencia de calor entre ambos fluidos.

A es el área efectiva de transferencia de calor.

³⁴ <http://www.cie.unam.mx>

Δt_m es la diferencia de temperaturas entre ambos fluidos.

Sin embargo, la temperatura de los fluidos en un intercambiador de calor generalmente varía de punto a punto mientras el calor fluye del fluido de mayor temperatura al de menor temperatura. Por lo que, no existe una única diferencia de temperatura para el intercambiador de calor. Para determinar que tanto cambia la transferencia de calor con respecto a esta temperatura cambiante se utiliza la siguiente ecuación.

$$dq = U dA \Delta t$$

La cual debe ser integrada sobre el área de transferencia de calor a través de la longitud del intercambiador de calor. Integrando esta ecuación para el caso ideal (contracorriente) obtenemos:

$$q = UA \frac{\Delta t_a - \Delta t_b}{\ln \left(\frac{\Delta t_a}{\Delta t_b} \right)}$$

Dónde los subíndices a y b se refieren respectivamente a los extremos del intercambiador de calor. Generalmente se utiliza una diferencia de temperaturas promedio efectiva llamada diferencia de temperaturas media logarítmica, la cual se debe evaluar cómo;

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_a - \Delta t_b}{\ln \left(\frac{\Delta t_a}{\Delta t_b} \right)}$$

Cuando el aire es uno de los fluidos del intercambiador de calor, la configuración en contraflujo generalmente no es muy conveniente. Para el caso del aire generalmente se utiliza la solución más económica la cual es un intercambiador de calor de tubos aletado con una configuración en contraflujo. Como se muestra en la figura 212. Es conveniente entonces expresar la diferencia media de temperaturas Δt_m para un intercambiador en contraflujo como:

$$\Delta t_m = F \Delta t_{m,ef}$$

Dónde

F es el factor de corrección

$\Delta t_{m,ef}$ es la diferencia de temperaturas media logarítmica para una configuración en contraflujo.

En el tercer anexo se encuentran las tablas de los factores de corrección para distintas configuraciones.

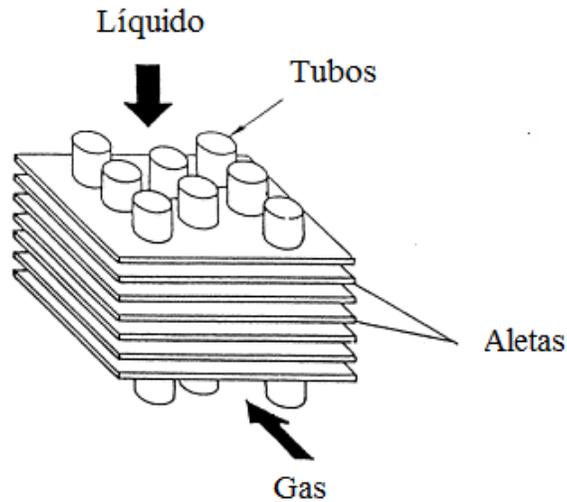


Figura 3.8 Intercambiador de calor de tubos aletados³⁵

3.3 Optimización de las bombas de calor geotérmicas.

3.3.1 Intercambiadores de calor

En lo que respecta a los intercambiadores de calor, hay ciertos criterios que se deben tomar en cuenta para lograr un mayor rendimiento:

1. Materiales de construcción

Para un mejor y continuo uso, los materiales para las válvulas y el intercambiador en sí, el diseño se debe hacer tomando en cuenta la corrosión en las condiciones de operación. Además de que los materiales deben de soportar las presiones y temperaturas de operación. Para los intercambiadores de calor tipo placa, también se requiere un material que pueda soportar esfuerzos de compresión o expansión.

2. Presiones y temperaturas de operación

Presión: La presión de diseño es de vital importancia para poder determinar el grosor de los componentes de los sellos. A mayor presión, mayor será el grosor de los sellos pero se tendrán ventajas debido a que se puede introducir el fluido a una mayor presión.

1 35Heat transfer enhancement in cross-flow heat exchangers using oval tubes and multiple delta winglets. S. Tiwari, D. Maurya, G. Biswas



- A bajas presiones, el flujo del fluido es muy alto y las pérdidas por presión permisibles son menores de lo normal.
- A altas presiones, el flujo del fluido es bajo y las pérdidas por presión permisibles son mayores de lo normal.
- Las presiones de operación de los Intercambiadores de Calor Tipo Placa son limitadas debido a que se tienen que tener las placas bien comprimidas y que el material de las juntas y sellos no soporta altas presiones de trabajo.

Temperatura de diseño: La temperatura de diseño es un parámetro muy importante que indica si el material a dicha temperatura puede soportar las presiones de operación y las cargas sobre los componentes.

Tendencia impulsora de la temperatura “Temperature Driving Force”: Este parámetro es importante debido a que es una medida del potencial para la transferencia de calor que existe en las condiciones de diseño. En una configuración de contraflujo la diferencia de temperaturas efectiva está definida por la temperatura media logarítmica (LMTD)³⁶. Para cualquier otro arreglo diferente al de contraflujo, la LMTD debe ser modificada mediante un factor de corrección F, dicho factor puede ser determinado analíticamente, pero usualmente se encuentran gráficas en función de la efectividad térmica y la capacidad térmica para cada configuración.

3. Configuración del flujo

Como se definió con brevedad, la elección de la configuración del flujo (contraflujo, flujo cruzado y flujo paralelo) depende de efectividad requerida, el tipo de intercambiador de calor, los sellos, como se tengan los flujos de entrada y salida, entre otros criterios de diseño.

4. Flujo másico

El flujo másico determina el área de flujo, mientras más alto sea el flujo, el área de flujo también lo será. Un área grande es necesaria para limitar la velocidad del flujo. La velocidad del flujo está limitada por la pérdida de presión, las incrustaciones, la erosión y en el caso de los intercambiadores de calor placa-tubo las vibraciones.

5. Parámetros de rendimiento: Efectividad térmica y Pérdidas de presión

Efectividad térmica: Para servicios que requieran una alta efectividad térmica generalmente se utilizan intercambiadores de placas y aletas, para cuando se requiere ligeramente menos efectividad se utilizan intercambiadores de tubos y aletas; teniéndose a los intercambiadores de calor de tubo y coraza como los de menor eficiencia térmica, esto tiene que ver con que tan compactos son los intercambiadores de calor.

³⁶ Por sus cifras en inglés Log Mean Temperature Difference

Perdidas de presión: La pérdida de presión en los intercambiadores de calor es un parámetro muy importante de diseño. Las limitaciones pueden darse debido a los altos costos de bombeo, las limitantes del proceso, o incluso ambas. Un intercambiador de calor debe ser diseñado en toda su medida tomando en cuenta los canales de distribución, codos, toberas, etc. Las pérdidas por presión son un factor relevante cuando se habla de un diseño económico.

6. Ensuciamiento

El ensuciamiento en los intercambiadores de calor se define como la formación de superficies no deseadas que impiden la transferencia de calor e incrementan la resistencia a fluir del fluido de trabajo; resultando en pérdidas de presión. El crecimiento de estos depósitos causa que el rendimiento termo-hidráulico de los intercambiadores baje con el tiempo. El ensuciamiento afecta el consumo de energía en procesos industriales y también genera que se tenga que aumentar la superficie de transferencia de calor para compensar los efectos de dicho fenómeno.

7. Tipo y fases de los fluidos

La fase en la que se encuentra el fluido en un intercambiador de calor es un importante parámetro de diseño. Hay varias combinaciones en las que estos se pueden encontrar: líquido-líquido, líquido-gas y gas-gas. Los fluidos en fase líquida son generalmente los más fáciles de manejar debido a que tienen una mayor densidad lo cual ayuda a incrementar los coeficientes de transferencia de calor. Sin embargo, algunos equipos como los intercambiadores de calor de placas son malos cuando la fase en la que se encuentran los fluidos no es 100% líquida.

8. Mantenimiento: inspección, limpieza, reparaciones y extensiones.

Hay que considerar la habilidad de cada intercambiador de calor respecto a estos aspectos. Por ejemplo, en las industrias farmacéuticas y de alimentos se requiere un rápido acceso a los componentes internos de los intercambiadores de calor para limpiezas frecuentes.

9. Factor económico

Hay dos costos mayores que se deben considerar en el diseño de intercambiadores de calor: el costo de manufacturar los elementos así como los costos de operación y mantenimiento. En general, mientras menor sea el área de transferencia de calor y menor sea la complejidad del diseño, el costo de manufactura será menor. Los costos de operación se basan generalmente en artefactos de bombeo como ventiladores, bombas, etc. Los costos de mantenimiento incluyen los de prevención y control de la corrosión y del ensuciamiento. Por lo que cuando se diseña un intercambiador de calor se tiene que tener un buen balance entre el tamaño necesario para los requerimientos térmicos y las pérdidas de presión.

3.3.2 Compresores

Como se menciona con anterioridad, el principio de operación de los compresores para las bombas de calor es el mismo que el de otros compresores recíprocos. Sin embargo, existen ciertas condiciones en las bombas de calor que raramente se encuentran en sistemas convencionales de aire acondicionado. Debido a esto, la relación de compresión cobra gran importancia en lo que respecta a las bombas de calor.

Por ejemplo, si durante un ciclo normal de refrigeración, si el sistema está trabajando a una temperatura de condensación de 120°F (48.89°C) y una temperatura de succión de 40°F (4.44°C)³⁷. Esto representaría una presión de descarga de 262 psig y una presión de succión de 69 psig.

Para determinar la relación de compresión tenemos:

$$CR = \frac{\textit{Presión de descarga absoluta}}{\textit{Presión de succión absoluta}}$$

Por lo que se tiene que añadir la presión atmosférica (14.7 psi) a los datos anteriores.

$$CR = \frac{262 + 14.7}{69 + 14.7} = 3.3$$

Esta relación de compresión es satisfactoria para un sistema de aire acondicionado convencional. Sin embargo, si el sistema es cambiado mediante una válvula reversible al modo de calefacción, el compresor no va a trabajar bajo las mismas condiciones debido a que las temperaturas que se manejan son menores que en los sistemas de aire acondicionado.

Por ejemplo, si durante un ciclo normal de calefacción la temperatura de succión puede llegar a ser de -20°F (-28.9°C), mientras que la temperatura de condensación se encuentra alrededor de los 100°F (37.8°C) para los sistemas convencionales. Obtenemos que:

$$CR = \frac{198 + 14.7}{10.3 + 14.7} = 8.5$$

Si tenemos en cuenta que la mayoría de los compresores de aire acondicionado no están diseñados para trabajar con relaciones de compresión mayores a 7.5, un compresor que trabaje a relaciones de compresión mayores a 8.5 no soportará las condiciones de operación por un largo periodo de tiempo.

³⁷ Datos de un sistema que utiliza un refrigerante R-22

Esta condición debe ser evitada como una medida de protección del compresor y del sistema mismo. Tomando en cuenta que el tiempo de vida útil de las bombas de calor geotérmicas se estima dentro de los 25 años, es de vital importancia considerar estos aspectos de rendimiento.

En el anexo 9 se observa una tabla con los principales refrigerantes utilizados en las bombas de calor.

3.3 Parámetros de rendimiento

El rendimiento de las bombas de calor se caracteriza principalmente por tres parámetros:

Coficiente de operación (COP), eficiencia de refrigeración (η) y capacidad volumétrica específica de enfriamiento o calentamiento (q).

3.3.1 Coeficiente de operación

El coeficiente de operación de una bomba de calor se define de distintas maneras dependiendo de si se habla del ciclo de enfriamiento o de calentamiento. En lo que respecta al calentamiento, es la relación entre el calor entregado al intercambiador de calor de alta temperatura y la energía neta necesaria para impulsar el ciclo. Mientras que en lo que respecta al enfriamiento, es la relación entre el calor absorbido por el intercambiador de calor de baja temperatura y la energía neta para impulsar el ciclo. Debido a que el numerador y denominador en estas relaciones poseen las mismas unidades el COP es un número adimensional.

El COP ideal es el COP de un ciclo termodinámico que opera reversiblemente a una temperatura constante y sin pérdidas de calor. El COP de un ciclo ideal puede ser calculado por las temperaturas de entrada y salida del ciclo. Para el modo de calefacción se tiene que:

$$COP_{c,i} = \frac{\text{Temperatura absoluta del vertedero de calor}}{\text{temperatura del vertedero} - \text{temperatura de la fuente de calor}}$$

Mientras que para el modo de enfriamiento se tiene que:

$$COP_{e,i} = \frac{\text{Temperatura absoluta de la fuente de calor}}{\text{temperatura del vertedero} - \text{temperatura de la fuente de calor}} = COP_{c,i} - 1$$

Ambas expresiones son válidas para cualquier tipo de refrigerante. El COP ideal viene siendo el máximo límite termodinámico que se puede obtener entre dos temperaturas. Por lo que, el COP de cualquier bomba de calor real siempre va a ser menor que el COP de un ciclo ideal. El COP de un ciclo real siempre tendrá alguna irreversibilidad. A continuación el COP de un ciclo teórico para el modo de calefacción.

$$COP_{c,t} = \frac{\text{Calor entregado al vertedero de alta temperatura}}{\text{Energía neta para mover el ciclo}}$$

Mientras que el COP real para el modo de calefacción es:

$$COP_{c,r} = \frac{\text{Calor real entregado al vertedero de alta temperatura}}{\text{Energía neta real para mover el ciclo}}$$

Para el ciclo de enfriamiento las relaciones son similares:

$$COP_{e,t} = \frac{\text{Calor removido de la fuente de baja temperatura}}{\text{Energía neta para mover el ciclo}}$$

$$COP_{e,r} = \frac{\text{Calor real removido de la fuente de baja temperatura}}{\text{Energía neta real para mover el ciclo}}$$

3.3.2 Eficiencia de refrigeración

La eficiencia de refrigeración es la relación de los dos COP. El denominador es el COP del ciclo de referencia. Es importante indicar mediante subíndices de que COP estamos hablando ya sea ideal, teórico o real. Por ejemplo:

$$\eta_{t,i} = \frac{COP_t}{COP_i}$$

$$\eta_{r,i} = \frac{COP_r}{COP_i}$$

$$\eta_{r,t} = \frac{COP_r}{COP_t}$$

Cabe mencionar que las eficiencias para los modos de calefacción y enfriamiento se calculan de manera independiente. La eficiencia de refrigeración $\eta_{t,i}$ se utiliza usualmente para evaluar el rendimiento de diferentes fluidos de trabajo en ciclos Clausius-Rankine. Las otras dos eficiencias $\eta_{r,i}$ y $\eta_{r,t}$ se utilizan mas para evaluar el rendimiento de los equipos individuales que utiliza el ciclo.

3.3.3 Capacidad volumétrica específica de enfriamiento o calentamiento

Las dimensiones de los componentes mecánicos del sistema es un factor importante para la evaluación de las bombas de calor, en estos casos se utiliza la capacidad volumétrica específica de enfriamiento calentamiento. Para la capacidad volumétrica específica de calentamiento es:

$$q_{v,c} = \frac{\text{Calor entregado al vertedero de alta temperatura}}{\text{Volumen del fluido de trabajo en operación}}$$

Para la capacidad volumétrica específica de enfriamiento se tiene:

$$q_{v,e} = \frac{\text{Calor absorbido de la fuente de baja temperatura}}{\text{Volumen del fluido de trabajo en operación}}$$

3.4 Configuración avanzada de las bombas de calor geotérmicas

3.4.1 Válvula reversible

Como en la mayoría de los sistemas, los sistemas reales en las bombas de calor geotérmicas cambian con respecto a los ciclos ideales. Estos sistemas difieren significativamente del ciclo ideal de Carnot. La mayoría de los sistemas que se usan hoy en día son los de compresión de vapor. El método de análisis de las bombas de calor por compresión de vapor es el mismo que los sistemas de refrigeración por compresión de vapor.

La mayoría de las bombas de calor por compresión de vapor que se utilizan para calefacción también pueden ser utilizadas como sistemas de aire acondicionado. Esto se logra con la ayuda de una válvula reversible, como se ilustra en la siguiente figura (213). Las líneas continuas representan el camino del fluido de trabajo en el modo de calefacción mientras que el camino indicado por la línea discontinua es aquel que sigue el fluido de trabajo en el modo de enfriamiento, cabe mencionar que para este caso, el evaporador ahora va a funcionar como un condensador y el condensador como si fuera un evaporador.

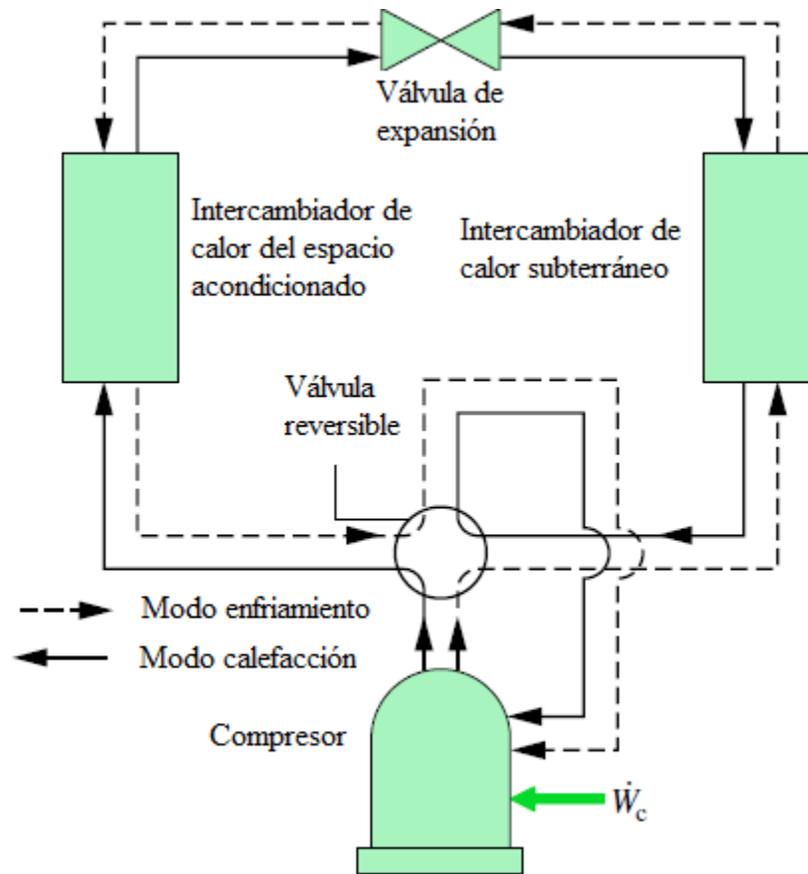


Figura 3-7 Principio de funcionamiento de válvula reversible³⁸

Como se acaba de mencionar, la válvula reversible cambia la dirección del fluido de trabajo en los sistemas de bombas de calor. Esto es debido a que la válvula reversible es únicamente una válvula de cuatro sentidos activada eléctricamente. Cuando esta se activa, cambia mecánicamente la dirección del flujo del refrigerante; estableciendo así, los dos modos de la bomba de calor: calefacción y enfriamiento.

³⁸ shapiro



Figura 3-8 Válvula reversible convencional³⁹

La válvula es accionada por una válvula de solenoide que utiliza un gas comprimido a alta presión para mover el pistón hacia la derecha o la izquierda, dependiendo cual sea el modo requerido.

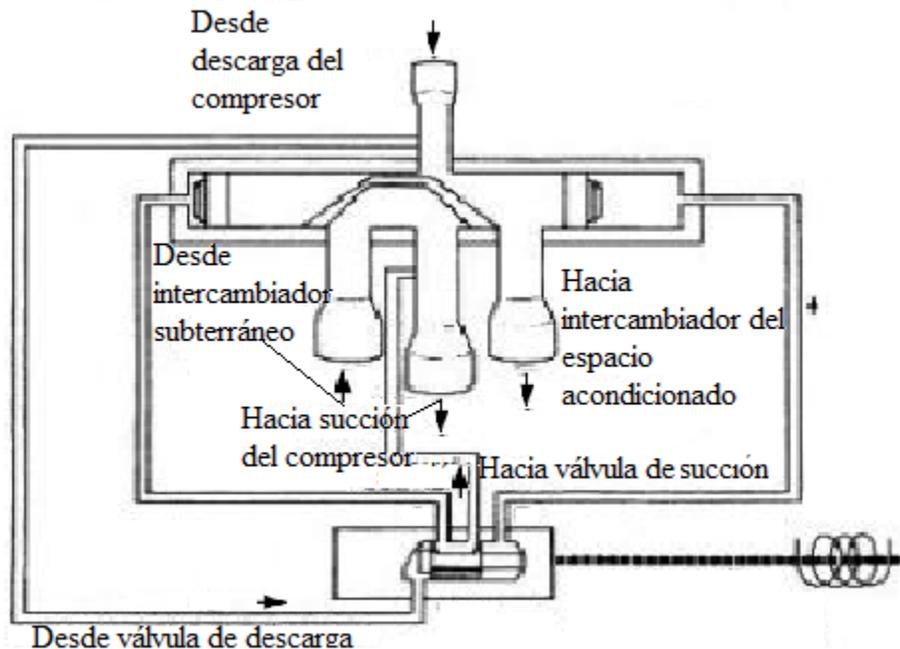


Figura 3-9 Configuración mecánica de válvula reversible⁴⁰

Físicamente, lo que es una típica válvula reversible, se observa en la figura 213123. Sin embargo, internamente (figura 3-9) es un sistema algo complejo, la válvula reversible está compuesta de dos pistones conectados a un bloque o cilindro deslizante con dos aberturas y un sistema de tubos interconectados al cilindro o bloque.

³⁹ Cortesía de Ningbo Sanheng Refrigeration

⁴⁰ Cortesía de Mitchell mechanical Heating & Air conditioning, Inc.

Estos tubos están conectados en el fondo con el cuerpo principal de la válvula reversible, el cual contiene un pistón que se moverá hacia un lado o hacia el otro, dependiendo de qué lado tenga una mayor presión. Cuando el pistón se desliza hacia el lado de menor presión, unirá el camino de la descarga del compresor con el de un intercambiador y formará un circuito con la tubería que viene desde el otro intercambiador de calor hacia el compresor. Esto cambiará la dirección del sistema; modificando así las funciones de los dos intercambiadores de calor.

3.4.2 Configuración en cascada

Este tipo de configuración de las bombas de calor se utiliza para mejorar la eficiencia global del sistema; logrando un mayor acercamiento entre la temperatura del subsuelo con la del espacio a acondicionar.

La configuración en cascada generalmente se utiliza para aprovechar el calor de los recursos geotérmicos de baja entalpía. Para el aprovechamiento de estos recursos se utiliza generalmente una bomba de calor de dos etapas. La bomba de calor consiste de dos etapas simples del ciclo de la bomba de calor en la cual, cada etapa utiliza un fluido de trabajo diferente.

A pesar de que las bombas de calor de varias etapas son más caras y más difíciles de analizar, son de gran ayuda debido a que presentan una gran flexibilidad de trabajo. Esto se debe a que al utilizar dos fluidos de trabajos diferentes se puede utilizar una gran cantidad de combinaciones para llegar al resultado deseado.

Por lo que se acaba de ver, se puede concluir que hay una gran cantidad de factores a tomarse en cuenta en lo que respecta al diseño y dimensionamiento de una bomba de calor. Para cada aplicación distinta, hay factores distintos a considerar y nunca hay un diseño igual. Los requisitos específicos del lugar y aplicación dictaran los distintos valores y configuraciones.

Ya que se vieron los distintos factores a considerar, queda escoger las condiciones requeridas para fines de este trabajo y así poder escoger una configuración adecuada. A continuación se hablará de la situación actual de las bombas de calor geotérmicas en México; logrando de esta manera escoger las condiciones bajo las cuales se realizará el diseño de una bomba de calor geotérmica.

4 Bombas de calor geotérmicas en México

4.1 Introducción

A la fecha, México es uno de los países con menos desarrollo en el área de las bombas de calor geotérmicas. Sin embargo, un cierto número de trabajos han sido desarrollados en el país. Cabe mencionar que, como en todos los países, el principal obstáculo para el desarrollo de las bombas de calor en México es la gran inversión inicial. Esto, se debe a que en la mayoría de los casos se tiene que realizar una excavación para la instalación de los intercambiadores de calor.

4.2 Antecedentes

En México, los primeros estudios del uso directo de la geotermia se hicieron entre los años de 1983 y 1985, como una cooperación del gobierno de baja california, un banco y una industria privada.⁴³ En este proyecto se investigó la posibilidad de instalar proyectos de acuicultura, agricultura, cría de animales y aire acondicionado. Sin embargo, estos proyectos no se concluyeron por falta de recursos.

Como se puede observar, fuera de la balneología, la historia de los usos directos en México (y por ende de las bombas de calor geotérmicas) es un campo joven que aun requiere mucho desarrollo. Esto se debe en parte a que la política energética respecto a la geotermia se ha enfocado principalmente en la generación directa de energía eléctrica con recursos geotérmicos de alta entalpia, debido a su alta rentabilidad.

En los últimos años, en el país se han desarrollado varios proyectos, en lo que respecta al uso de los recursos geotérmicos de baja entalpia, entre los que se encuentran: secado de frutas⁴⁴,

⁴³ Direct Use Activity in México, Geo-Heat Center Bulletin, John W. Lund. December 1991

⁴⁴ DESIGN OF SMALL FRUIT DRIER USING GEOTHERMAL ENERGY, Geo-Heat Center Bulletin, John W. Lund. February 1996

agricultura de hongos⁴⁵, balneología, acondicionamiento de espacios, desalación de agua de mar y generación de electricidad. Más adelante se hablará de estos últimos tres proyectos a mayor detalle debido a su importancia y complejidad tecnológica.

4.3 Potencial

4.3.1 Recursos geotérmicos de baja entalpia en México

Como se vio en el primer capítulo, México posee una gran cantidad de recursos geotérmicos debido a las condiciones geológicas del país. Sin embargo únicamente se han explotado a gran escala los recursos geotérmicos de alta entalpia. Esto nos deja un gran porcentaje de los recursos geotérmicos del país que no están siendo aprovechados.

La última estimación de los recursos geotérmicos de baja entalpia ($T < 200^{\circ}\text{C}$) fue realizada en 2010 por la Comisión Federal de Electricidad en conjunto con el Instituto de Investigaciones Eléctricas. En esta evaluación de los recursos geotérmicos de baja entalpia, para el 2010 se desarrollo una base de datos con 2361 manifestaciones superficiales en la cual se utilizó el método volumétrico para determinar el potencial energético de estos recursos.

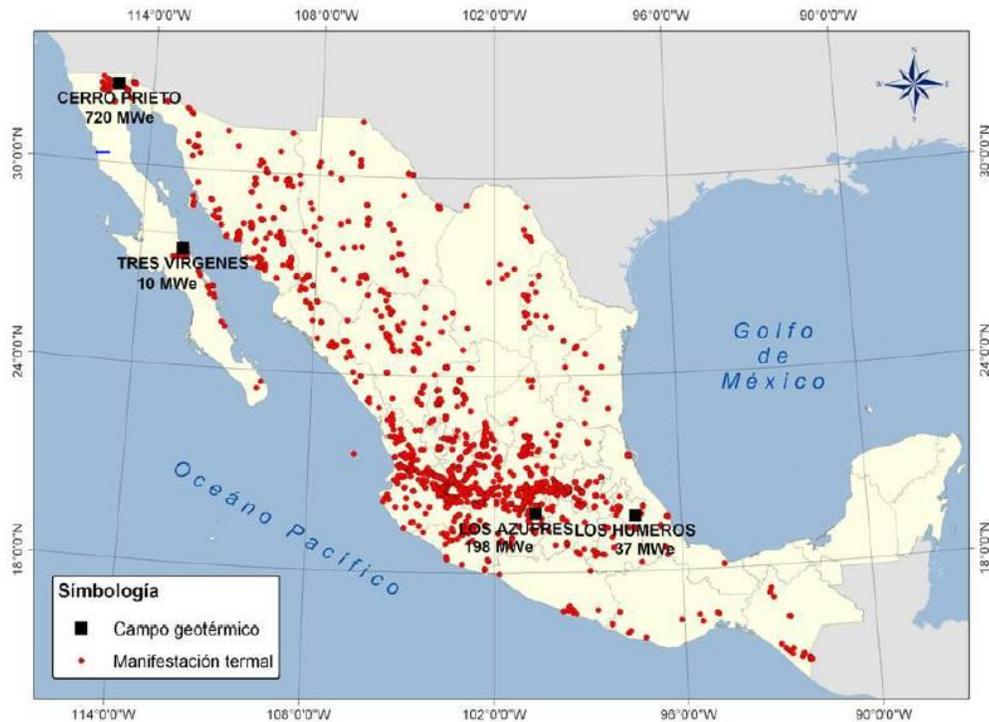


Figura 4-1 Estimación de recursos geotérmicos de baja entalpia en el país⁴⁶

⁴⁵ MUSHROOM GROWING PROJECT AT THE LOS HUMEROS, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad, María Elena Rangel Rangel, Diciembre 1998

⁴⁶ Resumen de evaluación de los recursos geotérmicos de temperatura intermedia a baja . Eduardo R. Iglesias, Rodolfo J. Torres, J. Ignacio Martínez-Estrella y Neftalí Reyes-Picasso. Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2010.

“Nuestras temperaturas de yacimiento más probables estimadas para los 918 sistemas geotérmicos cubren el rango 36-208°C. Cinco por ciento de estos sistemas tienen temperaturas entre 151 y 208°C, 40% de estos sistemas tienen temperaturas entre 102 y 151°C, 50% de estos sistemas tienen temperaturas entre 60 y 102°C y 5% de estos sistemas tiene temperaturas entre 36 y 60°C.

La magnitud de los recursos geotérmicos inferidos y de sus temperaturas asociadas es potencialmente importante para impactar positivamente el desarrollo económico de la República Mexicana.”⁴⁷

En el reporte se informa que la energía térmica agregada de las 918 localidades geotérmicas está entre los 1168 EJ y 1274 EJ con un 90 por ciento de intervalo de confianza. A continuación una tabla con los 26 estados de la república mexicana en donde se puede observar el intervalo de energía térmica calculado mediante el método volumétrico.

⁴⁷ Resumen de la evaluación 2010 de los recursos geotérmicos mexicanos de temperatura intermedia baja. Eduardo R. Iglesias, Rodolfo J. Torres, J. Ignacio Martínez-Estrella y Neftalí Reyes-Picass. Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Tabla 4-1 Energía geotérmica de baja entalpía disponible en el país⁴⁸

Estado	# de sistemas	# de manifestaciones	Energía térmica e intervalo 90%(EJ)		
			5%	Media	95%
Aguascalientes	16	49	22.111	28.422	35.618
Baja California	17	47	2.757	4.044	5.517
Baja California Sur	28	38	26.720	31.590	36.883
Chiapas	15	26	19.457	26.093	34.046
Chihuahua	24	56	25.861	29.938	34.420
Cohauila	12	17	12.034	15.270	18.912
Colima	3	4	1.662	2.981	4.576
Durango	47	54	34.119	37.955	42.117
Estado de Mexico	9	18	10.602	14.102	18.033
Guanajuato	89	146	123.112	135.806	149.202
Guerrero	10	10	4.585	5.908	7.510
Hidalgo	37	93	75.652	92.359	111.437
Jalisco	175	355	253.373	277.243	302.779
Michoacan	69	135	93.662	104.997	116.861
Morelos	6	10	5.480	8.170	11.353
Nayarit	69	134	100.865	115.551	131.387
Nuevo Leon	8	8	6.292	8.788	11.437
Oaxaca	11	12	6.615	8.442	10.445
Puebla	14	16	18.017	23.838	18.017
Queretaro	32	102	91.356	118.110	151.155
San Luis Potosi	25	45	27.438	33.442	39.908
Sonora	128	154	99.352	106.159	113.351
Tamaulipas	8	8	6.305	8.803	11.603
Tlaxcala	3	3	2.144	3.481	5.084
Veracruz	14	15	8.618	10.837	13.375
Zacatecas	49	76	62.366	72.042	83.079
TOTAL	918	1,631			

¿Y qué significa esto realmente? 1EJ (Exajule) quiere decir que estamos hablando de 1×10^{18} Jules de energía disponibles en un volumen específico. Entonces si se habla de que México tiene entre 1168 y 1274 EJ de recursos geotérmicos de baja entalpía disponibles y que, los usos directos de la geotermia no están siendo realmente aprovechados en el país. Se puede decir entonces que hay un gran potencial respecto a las bombas de calor geotérmicas en México. Si a esto se le agrega la consideración de que 26 de los 31 estados del país tienen la posibilidad de utilizar estos recursos naturales renovables, realmente se puede hablar de que se podría ahorrar una gran cantidad de energía abriendo la posibilidad de instalar bombas de calor geotérmicas en varias localidades del país.

Esto no se aplica únicamente a las bombas de calor geotérmicas sino a todos los usos directos de la geotermia.

⁴⁸ *Ibidem*

4.3.2 Recursos humanos y económicos

No sólo hay que tomar en cuenta los recursos geotérmicos en consideración cuando hablamos del potencial del país respecto a los recursos de baja entalpia. Para poder tener un panorama real del potencial que tiene el país se deben tomar en cuenta los recursos humanos y financieros del mismo.

En el congreso “Proceedings World Geothermal”, el cual ocurrió en Bali los días 25-29 de Abril, los investigadores Luis C.A. Gutiérrez Negrín⁴⁹, Raúl Maya-González⁵⁰ y José Luis Quijano-León⁵¹ emitieron un registro del número de profesionales que han ejercido la geotermia en el país. Se puede observar que el número de profesionales ejerciendo la geotermia está disminuyendo con el paso del tiempo lo que nos quiere decir que hay más gente que se retira de la geotermia que nuevos profesionales.

Tabla 4-2 Personal profesional dedicado a actividades geotérmicas (Únicamente personal con título profesional)

Año	Profesionales y año en que ejercieron					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
2005	4	101	30	0	2	21
2006	5	97	32	0	0	23
2007	5	89	35	0	0	21
2008	4	86	36	0	0	21
2009	6	85	33	0	0	21
Total	24	458	166	0	2	107

Notas:

- 1) Gobierno
- 2) Utilidades públicas
- 3) Universidades
- 4) Consultores extranjeros
- 5) Contribución mediante programas de ayuda extranjera
- 6) Industrias privadas

A continuación, una tabla del mismo reporte en el cual se observa la inversión que se ha realizado en la geotermia dentro del país. Como se puede observar hubo un gran decremento en la inversión para el periodo de 2005-2009. Cabe mencionar que hasta diciembre del 2013 no se tienen los datos del periodo 2009-2013. Como se ha mencionado con anterioridad, no se ha

⁴⁹ Geocónsul

⁵⁰ Comisión Federal de Electricidad

⁵¹ Asociación Geotérmica Mexicana

invertido nada en los usos directos de la geotermia por lo que no se ha aprovechado este gran potencial que se tiene en el país.

Tabla 4-3 Inversión y financiamiento de la geotermia en México (1995-2009)⁵²

Periodo	Investigación (incluyendo exploración) Millones USD	Producción (incluyendo perforación) Millones USD	Usos		Financiamiento	
			Directos Millones USD	Eléctricos Millones USD	Privado %	Público %
1995-1999	7.21	239.73	0	246.94	0	100
2000-2004	11.28	306.34	0	317.62	0	100
2005-2009	15.22	231.04	0	246.25	0	100

Es importante entonces, no únicamente impulsar el desarrollo tecnológico de la geotermia sino impulsar la generación de nuevos profesionales de la geotermia. Si no existen los suficientes recursos humanos y económicos en el país no se podrá alcanzar un verdadero desarrollo en el área de la geotermia.

4.4 Alcance

Uno de los principales limitantes de las BCG en México es que nuestro país posee –en la mayoría del territorio- un clima templado bastante agradable. Los sistemas de aire acondicionado y calefacción son utilizados regularmente en lugares con condiciones climáticas más extremas debido a que en estas situaciones el ahorro de energía es considerable; haciendo así redituable la considerable inversión inicial de la excavación.

En comparación con los sistemas convencionales de aire acondicionado, las BCG siempre son más redituables a largo plazo. El mayor problema –económicamente hablando- es que siempre va a ser mayor la inversión inicial de las BCG debido a la instalación del intercambiador de calor que se encuentra en el sumidero de calor (ya sea dentro de un cuerpo acuático o enterrado en el subsuelo).

Sin embargo, a largo plazo las BCG siempre son más redituables que los sistemas de aire acondicionado debido a su alto COP. El problema con esto en nuestro país, es que raramente se consideran los proyectos a largo plazo y como, inicialmente, un sistema de aire acondicionado convencional es más barato que una BCG, generalmente se optará por no implementar la BCG.

⁵² *Ibidem*

Si tomamos en cuenta estos factores, una implementación realmente redituable de las BCG en México, únicamente se puede realizar en localidades que cuentan con condiciones climáticas extremas. Cabe mencionar que, independientemente de si es redituable o no a corto plazo, la implementación de las BCG debería priorizarse en todos los países debido a que su COP tiene valores típicos de 3 a 4 (aunque se han reportado valores de hasta 10). De allí que las BCG tengan ahorros típicos del 50-75% ya que sólo se paga por la energía utilizada en el compresor y la energía del subsuelo es esencialmente gratis⁵³.

A continuación se realizará un cálculo simplificado de la ventaja de la aplicación de las BCG para el medio ambiente.

Si se considera que una vivienda en baja california tiene encendido el aire acondicionado 15.5 horas y que cuenta con dos sistemas de aire acondicionado:

$$15.5 \frac{\text{horas}}{\text{equipo}} \times 2 \text{ equipos} \times 30 \text{ dias} = 930 \frac{\text{horas}}{\text{mes}}$$

Y que un equipo de aire acondicionado consume 1.013 Kwh⁵⁴ y que los kilogramos de CO₂ que se generan por cada Kwh⁵⁵ son 0.178 Kg CO₂/Kwh:

$$930 \frac{\text{horas}}{\text{mes}} \times 1.013 \frac{\text{Kw}}{\text{horas}} \times 0.178 \frac{\text{Kg CO}_2 \text{ horas}}{\text{Kw}} = 167.69 \frac{\text{Kg CO}_2}{\text{mes}}$$

Si se considera que las BCG generan ahorros por lo menos del 50% de electricidad que un sistema de aire acondicionado convencional. Se tiene entonces que por lo menos se dejarían de emitir 83 Kg de CO₂ al mes (por vivienda) si se utilizaran BCG. Si se lleva este ahorro económico y ambiental a escala nacional o incluso mundial, se puede ver el potencial de esta tecnología.

5 Análisis técnico-económico de caso

5.1 Introducción

En este capítulo se realizará un análisis técnico-económico de un caso específico de BCG para ciertas condiciones en el país. Debido a que las BCG tienen una gran cantidad de factores a considerar, cada BCG es única dependiendo de las necesidades y condiciones. Sin embargo, se

⁵³ Estado actual de desarrollo de las Bombas de Calor Geotérmico , Alfonso García Gutiérrez e Ignacio Martínez Estrella

⁵⁴ EDENOR

⁵⁵ IEA

pueden adaptar los diseños a ciertas zonas del país. En este trabajo se realizará el análisis para una localidad en el estado de Baja California en la ciudad de Mexicali.

Mexicali se encuentra a 32° 39' 48" de latitud norte es una de las localidades en el país que invierte más recursos en aire acondicionado debido al intenso calor que se presenta, es la ciudad más septentrional de México y de América Latina con una temperatura máxima media de 42.1°C en el mes de Julio⁵⁶

5.2 Consideraciones

Como se comento con anterioridad, uno de los principales factores a considerar (debido al costo inicial del proyecto) es el factor económico. Es por esto que se tomo en cuenta el análisis en esta comunidad en especial, ya que en esta comunidad hay una considerable cantidad de cuerpos de agua.

El simple hecho de escoger las BCG con descarga en acuífero, es un gran factor económico a favor debido a que se están eliminando todos los costos de excavación e instalación del intercambiador de calor dentro del subsuelo. Sin embargo, al considerar una BCG con descarga en acuífero se generan nuevos factores a analizar.

Al utilizar una descarga en acuífero se tiene que tener cuidado en la salinidad del cuerpo de agua debido a que si se tienen concentraciones salinas considerables (>100 ppm)⁵⁷, se tiene que tener especial cuidado en el material del intercambiador de calor debido a que se tiene que evitar a toda costa la corrosión, incluso cuando se trata de BCG conectadas al subsuelo deben considerarse las condiciones corrosivas del suelo. Esto va a que una de las principales ventajas que tienen las BCG sobre los sistemas de aire acondicionado es su mayor rendimiento y duración.

Una de las principales consideraciones respecto a los sistemas de aire acondicionado y calefacción es la carga térmica de la vivienda a analizar. Para realizar el cálculo de la carga térmica se tienen que tomar en cuenta una gran cantidad de factores, sin embargo, debido a que no se va a hacer el análisis de una vivienda en específico, se tomaran las medidas de lo que se podría considerar una vivienda de tamaño promedio.

Sin embargo, varios factores se tienen que considerar como lo son latitud de la zona, temperatura promedio de la zona, materiales de la vivienda, orientación de la vivienda, ubicación de las ventanas, entre otras. Cabe mencionar que todo esto se verá a detalle a continuación y se explicaran las consideraciones tomadas.

⁵⁶ ESTADÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS BÁSICAS DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA (PERIODO 1961-2003), José Ariel RUIZ CORRAL, Gabriel DIAZ PADILLA, Sergio Decarlo GUZMAN RUIZ, Guillermo MEDINA GARCIA, Mario Marín SILVA SERNA CENTRO DE INVESTIGACION REGIONAL DEL NOROESTE

⁵⁷ Partes por millón, es la unidad de medida con la que se evalúa la concentración (en este caso salina). AN INFORMATION SURVIVAL KIT FOR THE PROSPECTIVE RESIDENTIAL GEOTHERMAL HEAT PUMP OWNER, Kevin Rafferty, Geo-Heat Center

En el caso de que se eligiera una configuración conectada al subsuelo, habría otros factores a considerar. Regularmente los que presentan una configuración vertical son más eficientes debido a que mientras más profundidad haya, se obtendrá una temperatura más constante que a profundidades bajas. Sin embargo los de configuración horizontal presentan ventajas en cuestión de espacio y económica, esto debido a que los trabajos de excavación son menos costosos que los de configuración vertical.

Independientemente de otros factores, el costo siempre deberá ser el principal factor a considerarse. Esto es causado debido a la falta de información que se tiene sobre BCG y que los usuarios no piensan en los beneficios a largo plazo que estas podrían brindarles.

Una vez considerado todos los factores locales y teniendo en cuenta la temperatura del sumidero de calor. Se debe escoger la configuración de la bomba de calor. Ya sea simple, en cascada, con o sin válvula reversible, etc.

Uno de los factores más importantes de las BCG es la selección de los fluidos de trabajo debido a que estos determinaran las temperaturas del espacio acondicionado y el sumidero de calor. Esto es de vital importancia debido a que –como ya se vio con anterioridad- dichas temperaturas determinaran en parte el COP de la BCG.

Como se sabe el COP de una BCG es el factor más importante a considerar porque da una idea de que tan eficiente es el sistema en general.

Para el sistema que se va a analizar, se tomara en cuenta una configuración en cascada debido a que el uso de dos refrigerantes genera la posibilidad de manejar con facilidad las temperaturas de sumidero de calor y espacio acondicionado ajustándolas al caso específico.

Debido a que se trata de una zona semidesértica se seleccionará una BCG con válvula reversible, todo esto para poder brindar la opción de calefacción en el invierno y de enfriamiento durante la temporada de calor.

5.3 Carga Térmica

Para el cálculo de la carga térmica se considero una vivienda de 100 m² la cual puede ser representativa entre las viviendas del país. Cabe mencionar que para el cálculo de la carga térmica se consideraron las condiciones más extremas: la peor orientación posible en la época del año con mayor radiación solar a esa latitud.

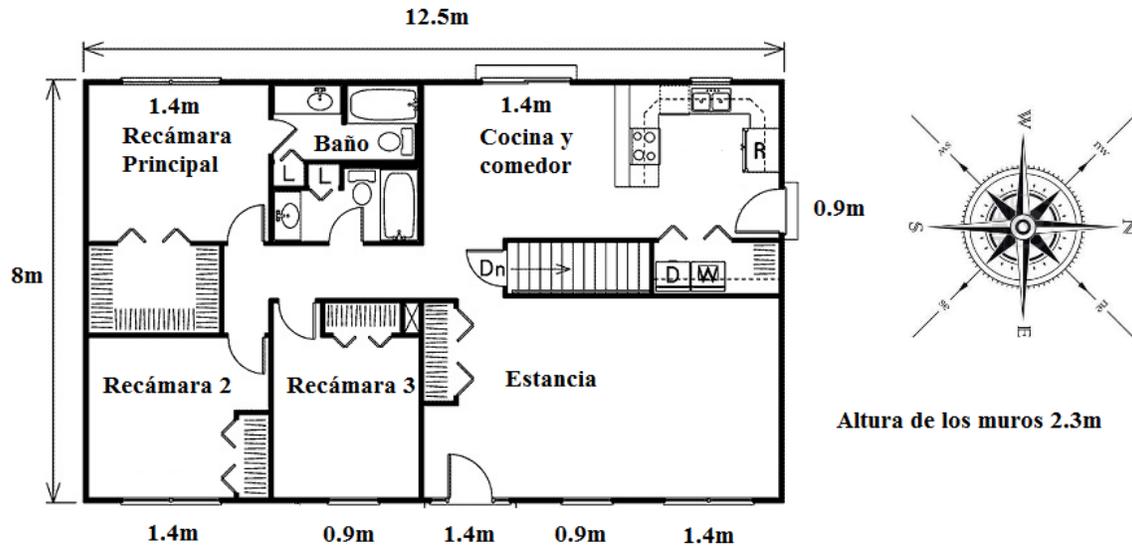


Figura 5-1 Plano de vivienda a analizar⁵⁸

5.3.1 Ventanas

Para realizar el cálculo de la carga térmica por las ventanas (de vidrio) se tiene que considerar la orientación correspondiente (Este) y los coeficientes de ganancia de calor solar por vidrios⁵⁹. Es importante utilizar las tablas de ganancia de calor solar a través de cristales para la latitud correspondiente (30° latitud norte⁶⁰). Cabe mencionar que se consideraron todas las ventanas con una altura de 1m.

De acuerdo con la orientación dada y el plano se obtuvieron las siguientes áreas para las ventanas:

$$A_{Norte} = 0.9m^2$$

$$A_{Este} = 6m^2$$

$$A_{Oeste} = 2.8m^2$$

Y para el cálculo de la carga térmica se tiene:

$$Carga\ térmica = Factor\ de\ ganancia\ solar * Área\ ventanas * F_{6mm}$$

Esto se calcula para todas las orientaciones donde haya ventanas en todas las horas solares y después se suma la carga térmica de cada orientación.

De esta manera que se encontró que la mayor carga térmica (2517.8179 Kcal/h) generada por las ventanas a la casa se daba en los meses de Julio y Mayo a las 16:00.

⁵⁸ Cortesía de Planos de casas

⁵⁹ $F_{6mm}=0.77$ (Cortesía Vitro)

⁶⁰ Baja California cuenta con una latitud norte de 32°, sin embargo se tomó la tabla de ganancia solar más cercana la cual es de 30° latitud norte (Anexo 7).



Epoca	Orientación	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	
21-jun	N	53.53991	47.05022	29.203588	22.713901	22.713901	22.7139	22.713901	22.7139	22.7139	22.7139	29.20359	47.05022	53.53991	
	E	1168.1435	1687.318	1741.3991	1546.7085	1059.9821	475.9103	151.42601	151.426	151.426	151.426	129.7937	108.1614	54.08072	
	O	25.237668	50.47534	60.570404	70.665471	70.665471	70.66547	244.80538	396.2314	668.7982	895.9372	971.6502	942.6269	652.7543	
	Qtot = Qmax =	1831.1731													
Epoca	Orientación	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
22 Julio y 21-may	N	53.53991	60.0296	50.295067	55.162332	60.029597	63.27444	64.896861	63.27444	60.0296	55.16233	50.29507	60.0296	53.53991	
	E	1211.4081	2141.596	2336.287	2109.148	1600.7892	886.9238	454.27803	886.9238	1600.789	2109.148	2336.287	2141.596	1211.408	
	O	40.380269	90.85561	131.23587	156.47354	176.66368	191.8063	211.99641	191.8063	176.6637	156.4735	131.2359	90.85561	40.38027	
	Qtot = Qmax =	2517.8179													
Epoca	Orientación	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
24 Agosto y 20-abr	N	19.469058	27.58117	37.315695	45.427803	51.917489	55.16233	56.784754	55.16233	51.91749	45.4278	37.3157	27.58117	19.46906	
	E	886.92377	2065.883	2336.287	2130.7803	1611.6054	876.1076	411.01345	876.1076	1611.605	2130.78	2336.287	2065.883	886.9238	
	O	25.237668	75.713	111.04574	141.33094	161.52108	171.6161	191.80628	171.6161	161.5211	141.3309	111.0457	75.713	25.23767	
	Qtot = Qmax =	2484.6484													
Epoca	Orientación	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
22 Septiembre y 22-mar	N	0	8.112108	16.224215	19.469058	21.09148	22.7139	22.713901	22.7139	21.09148	19.46906	16.22422	8.112108	0	
	E	0	1341.202	1708.9507	1557.5247	1114.0628	519.1749	151.42601	151.426	140.6099	129.7937	108.1614	54.08072	0	
	O	0	25.23767	50.475336	60.570404	65.617937	70.66547	70.665471	242.2816	519.896	726.8448	797.5103	625.8942	0	
	Qtot = Qmax =	1775.6502													
Epoca	Orientación	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
22 Octubre y 20-feb	N	0	4.867265	12.979372	17.846637	19.469058	21.09148	22.713901	21.09148	19.46906	17.84664	12.97937	4.867265	0	
	E	0	854.4753	1460.1794	1427.7309	1016.7175	465.0942	151.42601	140.6099	129.7937	118.9776	86.52915	32.44843	0	
	O	0	15.1426	40.380269	55.52287	60.570404	65.61794	70.665471	217.0439	474.4682	666.2744	681.417	398.7552	0	
	Qtot = Qmax =	1513.539													
Epoca	Orientación	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
21 Noviembre y 21-ene	N	0	1.622422	9.7345292	14.601794	17.846637	19.46906	19.469058	19.46906	17.84664	14.60179	9.734529	1.622422	0	
	E	0	292.0359	1178.9596	1254.6726	897.73991	378.565	129.79372	129.7937	118.9776	97.34529	64.89686	10.81614	0	
	O	0	5.047534	30.285202	45.427803	55.52287	60.5704	60.570404	176.6637	418.9453	585.5139	550.1812	136.2834	0	
	Qtot = Qmax =	1314.7022													
Epoca	Orientación	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
22-dic	N	0	0	6.4896861	14.601794	17.846637	19.46906	19.469058	19.46906	17.84664	14.60179	6.489686	0	0	
	E	0	0	995.0852	1135.6951	865.29148	346.1166	129.79372	129.7937	118.9776	97.34529	43.26457	0	0	
	O	0	0	20.190135	45.427803	55.52287	60.5704	60.570404	161.5211	403.8027	529.991	464.3731	0	0	
	Qtot = Qmax =	1195.7247													
Qmax-total =		2517.8179	Julio y Mayo					Q en Kcal/h							

Figura 5-2 Carga térmica generada por ventanas en Baja California para vivienda a analizar (Orientación Este).

5.3.2 Muros

Para el cálculo de la carga térmica de los muros no se consideró el muro sur debido a que se está tomando en consideración que la vivienda se encuentra al lado de otra. El cálculo de la carga térmica de esta sección se realizó con ayuda del software libre de la CONAE "Metodología para el cálculo de la ganancia de calor". Con ayuda del software se logró calcular el coeficiente global de transferencia de calor (U) de una pared compuesta de tabique aislante, yeso y mortero. Se propusieron espesores de 0.14m para el tabique, 0.05m para la capa aislante y 0.03m para el mortero y el yeso respectivamente. Los datos correspondientes para el cálculo de la ganancia térmica de los muros son los siguientes:

$$h_{ext} = 29.3 \left[\frac{Kcal}{hm^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad h_{int} = 8.1 \left[\frac{Kcal}{hm^2 \cdot ^\circ C} \right]$$

$$K_{tabique} = 0.7 \left[\frac{Kcal}{hm \cdot ^\circ C} \right] \quad K_{aislante} = 0.035 \left[\frac{Kcal}{hm \cdot ^\circ C} \right]$$

$$K_{yeso} = 0.14 \left[\frac{Kcal}{hm^{\circ}C} \right] \quad K_{mortero} = 0.75 \left[\frac{Kcal}{hm^{\circ}C} \right]$$

$$U_{muros} = \frac{1}{\frac{1}{29.3} + \frac{0.14}{0.7} + \frac{0.05}{0.035} + \frac{0.03}{0.14} + \frac{0.03}{0.75} + \frac{1}{8}} = 0.4909 \left[\frac{Kcal}{hm^2^{\circ}C} \right]$$

De acuerdo con la orientación dada y el plano se obtuvieron las siguientes áreas para las ventanas:

$$A_{Norte} = 16.33m^2$$

$$A_{Este} = 14.95m^2$$

$$A_{Oeste} = 22.31m^2$$

Para la temperatura exterior se utilizó la temperatura máxima media en el mes de Julio (42.1°C⁶¹) y para la temperatura interior se consideraron las recomendaciones del IMSS⁶² (25°C⁶³). Utilizando las tablas de ganancia de calor solar a través de muros⁶⁴ y las áreas de cada orientación se obtuvo la carga térmica máxima generada por los muros (437.51368 Kcal/h).

Latitud Norte Pared hacia:	A.M						
	6	7	8	9	10	11	12
NO	0	0	78.43098	78.43098	78.43098	78.431	78.43098
SE	0	0	79.12985	79.12985	79.12985	79.1299	79.12985
SO	0	0	118.0861	118.0861	118.0861	118.086	118.0861
Qtot(Muros)=	0	0	275.6469	275.6469	275.6469	275.647	275.6469
Qmax =	437.5137						

Latitud Norte Pared hacia:	P.M											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	Color de la pared exterior blanca											
NO	78.431	78.431	82.4326	86.4341	90.4357	94.4373	98.4389	102.44	118.447	134.453	134.4531	134.453
SE	93.7835	108.437	112.101	115.764	115.764	115.764	112.101	108.437	108.437	108.437	108.4372	108.437
SO	118.086	118.086	123.553	129.02	134.487	139.954	156.355	172.756	183.689	194.623	189.1564	183.689
Qtot(Muros)=	290.301	304.954	318.086	331.218	340.687	350.155	366.894	383.633	410.573	437.514	432.0467	426.58
Qmax =	437.5137											

Figura 5-3 Carga térmica generada por muros en Baja California para vivienda a analizar (Orientación Este).

⁶¹ ESTADÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS BÁSICAS DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA (PERIODO 1961-2003), José Ariel RUIZ CORRAL, Gabriel DIAZ PADILLA, Sergio Decarlo GUZMAN RUIZ, Guillermo MEDINA GARCIA, Mario Marín SILVA SERNA CENTRO DE INVESTIGACION REGIONAL DEL NOROESTE

⁶² IMSS

⁶³ Según Seguro social cuando la temperatura ambiente es mayor de 35°C las condiciones de confort son Temperatura de bulbo seco=25°C con una humedad relativa de 50%

⁶⁴ Anexo 7

5.3.3 Techo

El cálculo de la carga térmica del techo es similar al de los muros. El cálculo de la carga térmica de esta sección se realizó con ayuda del software libre de la CONAE “Metodología para el cálculo de la ganancia de calor”. Con ayuda del software se logró calcular el coeficiente global de transferencia de calor (U) de una pared compuesta de tabique aislante, y yeso. Se propusieron espesores de 0.15m para el concreto, 0.05m para la capa aislante y 0.02m para el yeso. Los datos correspondientes para el cálculo de la ganancia térmica de los muros son los siguientes:

$$K_{concreto} = 0.15 \left[\frac{Kcal}{hm^{\circ}C} \right] \quad K_{aislante} = 0.05 \left[\frac{Kcal}{hm^{\circ}C} \right]$$

$$K_{yeso} = 0.14 \left[\frac{Kcal}{hm^{\circ}C} \right]$$

$$U_{muros} = \frac{1}{\frac{1}{29.3} + \frac{0.15}{1.5} + \frac{0.05}{0.035} + \frac{0.02}{0.14} + \frac{1}{8}} = 0.54674 \left[\frac{Kcal}{hm^2^{\circ}C} \right]$$

Se obtuvo que la mayor carga térmica generada por el techo se daba a las 18:00 (2037.69 Kcal/h).

A.M						
6	7	8	9	10	11	12
0	0	733.0701	733.0701	733.0701	981.568	1230.067
Qmax =	2037.69					

P.M											
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1478.57	1727.06	1851.31	1975.56	2006.62	2037.69	1882.37	1727.06	1478.57	1230.07	1136.88	1043.69
Qmax =	2037.69										

Figura 5-4 Carga térmica generada por el techo en Baja California para vivienda a analizar (Orientación Este).

5.3.4 Cargas internas

Debido a que la mayoría de la carga interna se debe a los habitantes y la iluminación, solamente se consideraran estos dos factores. Para el cálculo de las carga internas se considerarán cuatro personas y 10 focos de 100 Watts con una eficiencia luminosa de 14%.

$$Carga\ interna\ habitantes = 4 \times 58 \frac{Kcal}{h} = 232 \frac{Kcal}{h}$$

$$Carga\ interna\ iluminación = 10 \times 0.86 \times 74.74 \frac{Kcal}{h} = 642.746 \frac{Kcal}{h}$$

Si al total de cargas internas (874.746 Kcal/h) le sumamos las cargas externas tenemos una carga térmica total de 5699.3619 Kcal/h.

5.4 Bomba de calor

Como se mencionó con anterioridad se dimensionalizará una BCG con descarga en acuífero para la carga térmica obtenida. Se analizará el ciclo en modo de enfriamiento considerando una configuración en cascada debido a que esta configuración requiere de menos potencia eléctrica que una de configuración simple.

5.4.1 Enfriamiento

Este dispositivo en cascada utiliza dos refrigerantes diferentes, R227EA en la primera etapa y R152A en la segunda etapa. Esto es para aprovechar las diferentes propiedades de los refrigerantes, esto reduce la potencia necesaria para impulsar el ciclo.

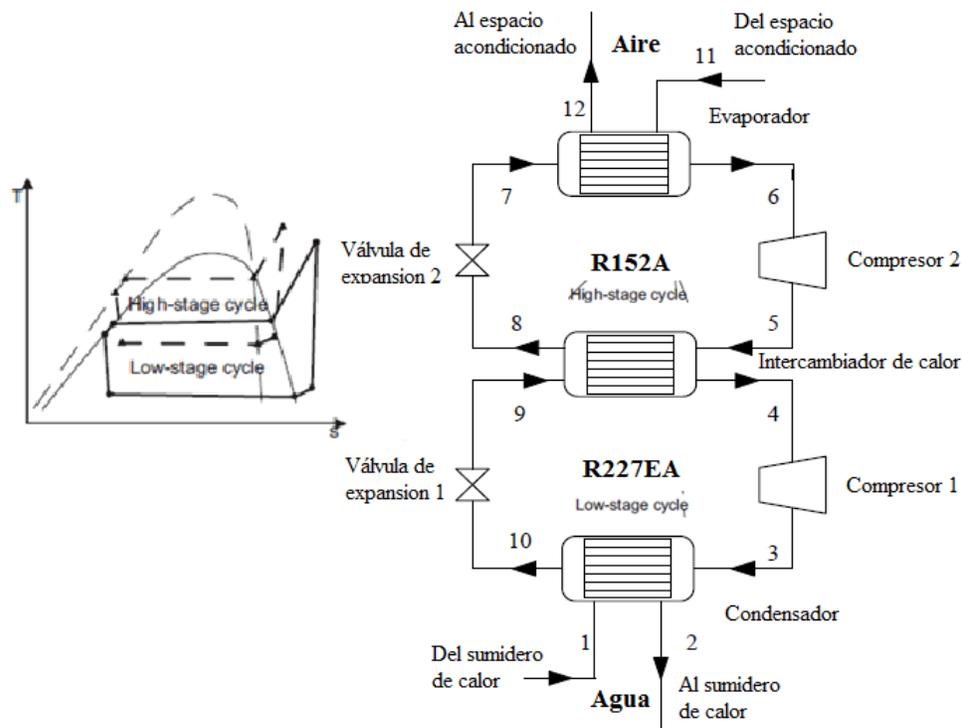


Figura 5-5 Diagrama en cascada de bomba de calor geotérmica a analizar

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los estados termodinámicos de la BCG propuesta. El valor final de la potencia de las bombas es de 0.675 KW/h. Cabe mencionar que la potencia relativamente elevada tiene que ver con que el caso que se eligió es el de mayor carga térmica posible. Sin embargo, se puede decir que por lo menos es 32.5% más eficiente que un sistema de aire acondicionado convencional.

Punto												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T(°C)	22.000	20.000	24.659	20.874	23.256	19.173	19.173	23.256	20.874	24.659	42.000	25.000
P(MPa)	0.100	0.100	0.450	0.400	0.550	0.500	0.500	0.550	0.400	0.450	0.100	0.100
Gasto(Kg/s)	1.725	1.725	0.140	0.140	0.046	0.046	0.046	0.046	0.140	0.140	0.685	0.685
Densidad(Kg/m ³)	997.773	998.207	1389.106	31.858	16.953	15.516	15.516	16.953	31.858	35.825	1.105	1.169
Entalpia Mezcla(KJ/Kg)	92.373	84.006	331.031	327.949	522.669	519.587	263.649	240.592	235.905	228.282	315.567	298.450
Calidad(%)			SC	0.900	SC	0.900	0.106	0.000	0.106	0.000		
Fluido	Water	Water	R227EA	R227EA	R152A	R152A	R152A	R152A	R227EA	R227EA	Air	Air

Figura 5-6 análisis termodinámico de bomba de calor geotérmica

5.5 Análisis de Factibilidad

El análisis de rentabilidad es la principal limitante cuando se habla de las BCG. El costo inicial siempre va a ser mayor al de los sistemas convencionales de aire acondicionado y aunque los costos de mantenimiento y operación son mucho menores para las BCG, el tiempo de retorno generalmente es muy grande. Esta es la principal razón por la que no hay tantas BCG actualmente. A continuación se realizará un análisis tomando en cuenta el costo extra que genera escoger una BCG sobre un sistema de aire acondicionado convencional.

La principal limitante de las BCG es la instalación del sistema. El costo de inversión de las BCG se basa en la cantidad de toneladas de refrigeración que debe enfriar. Generalmente el costo por tonelada de refrigeración de una BCG es de \$2500 USD⁶⁵. El sistema analizado tiene una carga térmica de 5699.3619 Kcal/h lo que equivale a 3.647 toneladas de refrigeración si se quiere enfriar a 25°C.

$$\text{Costo} = \text{USD } 3.647 \times \$ 2500 \text{ USD} \times 12.862729 \frac{\text{M. N}}{\text{USD}} = 117,050.8339 \text{ M. N.}$$

Para un sistema de aire acondicionado de 5699.3619 Kcal/h (47 000 BTU) el equipo ideal se obtuvo del catálogo de Trane Air Conditioning Systems⁶⁶ para 48 000 BTU (Ver Anexo 8) el precio es de \$ 54,449 M.N. lo que nos dejaría un costo adicional de 62,600. Dicho costo extra sigue siendo muy elevado, por lo que se tiene que hacer un análisis del ahorro eléctrico para determinar si es factible o no implementar una BCG para este caso.

Considerando que la tarifa de consumo eléctrico para Baja California en el mes de Mayo y considerando que el equipo trabaja 12 horas diarias.

⁶⁵ Cortesía de RYE Home Energy Consulting & House Planning

⁶⁶ Cortesía de de Trane Air Conditioning Systems

CARGOS POR	DIC./2012	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
Cargo fijo (\$/mes)	78.81	79.30	79.05	78.80	78.85	78.63	77.95						
CUOTAS POR ENERGÍA CONSUMIDA EN VERANO													
(\$/kWh)	3.602	3.617	3.546	3.523	3.556	3.654	3.615						

Notas:

El periodo de aplicación de las cuotas de verano comprende los 6 meses más cálidos del año, de acuerdo a las observaciones de las estaciones termométricas que rijan cada localidad. Los 6 meses restantes se aplican las cuotas fuera de verano.

Figura 5-7 Cuotas mensuales en verano para Baja California⁶⁷

$$\text{Ahorro mensual} = 3.654 \frac{\text{Kw}}{\text{h}} * 0.325 * 12\text{h} * 30 \text{ días}$$

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Cuota [\$/Kwh]	3.617	3.546	3.523	3.556	3.654	3.615
Ahorro [\$]	437.2953	387.2232	425.9307	416.052	441.7686	422.955
Mes	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Cuota [\$/Kwh]	3.609	3.623	3.536	3.49	3.568	3.602
Ahorro [\$]	436.3281	423.891	413.712	421.941	417.456	435.4818

Figura 5-8 Ahorro eléctrico anual de bomba de calor geotérmica⁶⁸

Con esto se tiene un ahorro anual de \$ 5080.0347 en comparación con un sistema convencional de aire acondicionado de 1Kw/h. Considerando una tasa de descuento del 15% anual y el ahorro eléctrico anual se obtiene una tiempo de retorno de la inversión de 13.73 años.

⁶⁷ CFE

⁶⁸ Para los valores de Julio a Diciembre se utilizaron los datos del 2012.

TABLA DE VALORES PRESENTES						
		Ahorro de Consumo Eléctrico Anual		5080	M.N.	
		Tasa de Oportunidad (Tasa de descuento)		15	% Anual	
año	Deflactor	Ahorro por Consumo eléctrico	VPN de la Inversión	VP NETO Mensual	VPN Acumulado	T Retorno Años
			costo extra			
0	1	0	\$62,600.00	-62600	-62600	
1	0.98522167	5004.926108	0	5003.94089	-57596.059	
2	0.97066175	4930.961683	0	4929.99102	-52666.068	
3	0.95631699	4858.090328	0	4857.13401	-47808.934	
4	0.94218423	4786.29589	0	4785.35371	-43023.58	0
5	0.92826033	4715.562453	0	4714.63419	-38308.946	0
6	0.91454219	4645.874338	0	4644.9598	-33663.986	0
7	0.90102679	4577.216097	0	4576.31507	-29087.671	0
8	0.88771112	4509.572509	0	4508.6848	-24578.987	0
9	0.87459224	4442.92858	0	4442.05399	-20136.933	0
10	0.86166723	4377.269537	0	4376.40787	-15760.525	0
11	0.84893323	4312.580825	0	4311.73189	-11448.793	0
12	0.83638742	4248.848103	0	4248.01172	-7200.7811	0
13	0.82402702	4186.057245	0	4185.23322	-3015.5478	0
14	0.81184928	4124.19433	0	4123.38248	1107.83464	13.7313287

Figura 5-9 Tabla de valores presentes para bomba de calor geotérmica

Como ya se mencionó con anterioridad, el tiempo de vida de una BCG es de alrededor de 25 años. Esto podría considerarse un buen tiempo de retorno considerando el largo periodo de vida del equipo, sin embargo sigue siendo una inversión no tan accesible para la mayoría de los mexicanos.

Lo que mucha gente no sabe, es que existen una gran cantidad de apoyos públicos y privados para impulsar el desarrollo de las energías renovables ya sea para empresas o ciudadanos. En México, la mayoría de los apoyos están enfocados en el desarrollo de la energía solar fotovoltaica y solar térmica. Sin embargo, existen varios programas para los cuales las BCG califican.

Los programas que existen en la actualidad en país dentro de los cuales las BCG calificarían son:

- Hipoteca Verde (INFONAVIT)
- Eficiencia energética y calentadores solares de agua (FIDE-CFE)
- Criterios e Indicadores de los Desarrollos Habitacionales Sustentable (CONAVI)
- Desarrollos Urbanos Integrales Sustentables (Sociedad Hipotecaria Federal)

Por ejemplo, el programa mejoramiento de vivienda⁶⁹ es un esfuerzo conjunto de la CONAVI (Comisión Nacional de Vivienda) y la SEDATU (Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano) en su modalidad de puntaje de ubicación y sustentabilidad del entorno provee de un

⁶⁹ Cortesía conavi

subsidio de hasta \$17,324.59 M.N. para proyectos que cuenten con ciertos criterios de ahorro de energía.

Si consideramos este subsidio inicial el costo adicional del proyecto se reduce a \$ 45,275 M.N. y el tiempo de retorno se ve reducido a 9.67 años.

Tabla de Valores Presentes de Bomba de Calor Geotérmica(con financiamiento CONAVI)						
		Ahorro de Consumo Eléctrico Anual		5080	M.N.	
		Tasa de Oportunidad (Tasa de descuento)		15	% Anual	
año	Deflactor	Ahorro por Consumo eléctrico	VPN de la Inversión	VP NETO Mensual	VPN Acumulado	T Retorno Años
			costo extra			
0	1	0	\$45,275.41	-45275.41	-45275.41	
1	0.98522167	5004.926108	0	4990.14778	-40285.262	
2	0.97066175	4930.961683	0	4916.40176	-35368.86	
3	0.95631699	4858.090328	0	4843.74557	-30525.115	
4	0.94218423	4786.29589	0	4772.16313	-25752.952	0
5	0.92826033	4715.562453	0	4701.63855	-21051.313	0
6	0.91454219	4645.874338	0	4632.15621	-16419.157	0
7	0.90102679	4577.216097	0	4563.70069	-11855.456	0
8	0.88771112	4509.572509	0	4496.25684	-7359.1995	0
9	0.87459224	4442.92858	0	4429.8097	-2929.3898	0
10	0.86166723	4377.269537	0	4364.34453	1434.95476	9.67120956

Figura 5-10 Tabla de valores presentes considerando subsidio

Como se sabe, al utilizar menor energía eléctrica, las BCG reducen las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Si consideramos que se generan 0.6 Kg de CO₂ por Kwh⁷⁰ se tiene que al año la cantidad de kilogramos que se dejan de emitir a la atmósfera (por vivienda) es de:

$$Kg CO_2 (anual) = 0.6 Kg \frac{CO_2}{Kw} h * 0.325 \frac{Kw}{h} * 12 h * 365 = 854.1 Kg CO_2$$

No hay un valor “oficial” sobre el precio de una tonelada de CO₂ reducida o no emitida. Aunque algunas agencias multilaterales han establecido ciertos precios para los proyectos de reducción de emisiones financiados por ellas mismas (por ejemplo, hasta 2005, el Banco Mundial emplea un precio de \$5 dólares por tonelada de CO₂ equivalente no emitida)⁷¹.

Debido a que esta cantidad es relativamente pequeña para un financiamiento por bonos de carbono, esta modalidad sólo aplicaría para un proyecto estatal o para las empresas.

Independientemente de si se puede realizar un financiamiento de bonos de carbono o no, es importante resaltar el hecho de que se estén evitando emisiones de de CO₂ a la atmósfera gracias a esta tecnología.

⁷⁰ Cortesía de U.S. Energy information Administration

⁷¹

Si a esto le añadimos los posibles créditos y financiamientos que ofrecen los demás programas, la inversión en una BCG es más accesible de lo que parece a primera vista. Y si agregamos el hecho que la vida útil de las BCG es mucho mayor que los sistemas de aire acondicionado convencionales, estamos hablando de los importantes beneficios económico ambientales que tienen las BCG.

6 Conclusiones

Conociendo la prospectiva eléctrica del sector eléctrico para el 2024 se puede decir que queda mucho por hacer en México en lo que respecta a la energía geotérmica y las demás energías renovables.

Es importante mencionar que los usos directos en el país tienen un gran potencial y no están siendo explotados correctamente. A pesar de tener tantos recursos únicamente un 0.01% no es utilizado en la balneología.

Las Bombas de Calor Geotérmicas son una gran área de oportunidad en nuestro país que está siendo desaprovechada. En el siguiente capítulo se hablara más a detalle sobre las bombas de calor, sus ventajas y desventajas así como su funcionamiento a detalle.

En lo que respecta a las BCG hay una gran cantidad de variables a considerar. Sin embargo, estas variables se verán a mayor detalle en los apartados “configuración a detalles de las bombas de calor” y “optimización de las bombas de calor”. Debido a esta gran cantidad de variables a considerar, los valores de rendimiento de las bombas de calor geotérmicas varían de gran manera.

De igual forma los materiales utilizados para construir las bombas de calor geotérmicas van a depender de la naturaleza del suelo, de la carga térmica y de los fluidos con los que se trabajará. Por esto, una desventaja de las BCG es la dificultad de medir y predecir todos los factores que alteran el rendimiento de estas.

La eficiencia de una bomba de calor por compresión mecánica se mide con un parámetro llamado COP (por sus siglas en inglés Coefficient of Performance). Este parámetro es muy importante debido a que nos dice cuantas unidades de energía térmica se alimentaran por cada unidad de energía alimentada.

Si se considera que las BCG generan ahorros por lo menos del 50% de electricidad que un sistema de aire acondicionado convencional. Se tiene entonces que por lo menos se dejarían de emitir 83 Kg de CO₂ al mes (por vivienda) si se utilizaran BCG. Si se lleva este ahorro económico y ambiental a escala nacional o incluso mundial, se puede ver el potencial de esta tecnología.

Los valores típicos del COP de las BCG son de 3.5, aunque se han reportado valores de hasta 10. Esto quiere decir que por cada unidad de energía alimentada (usualmente electricidad) se entregan 3.5 unidades de energía térmica, de las cuales 2.5 (71%) son de energía geotérmica la cual es esencialmente gratis.

Por estas mismas razones las BCG son realmente una buena opción en lo que respecta a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero debido a que el acondicionamiento de

espacios se da alrededor de todo el mundo ya sea para calentar o enfriar (comercial, pública y domésticamente).

Sin embargo, la mayor desventaja de las BCG es el gran costo inicial del proyecto. Esto se debe a que se tiene que realizar perforaciones para instalar el equipo a cierta distancia de la superficie. Esto representa uno de los mayores costos de todo el proyecto. Si las condiciones y naturaleza del subsuelo y/o de los acuíferos son agresivas para los materiales, otro gran costo son los materiales de las BCG debido a que deben ser capaces de resistir condiciones corrosivas a lo largo de su periodo de vida.

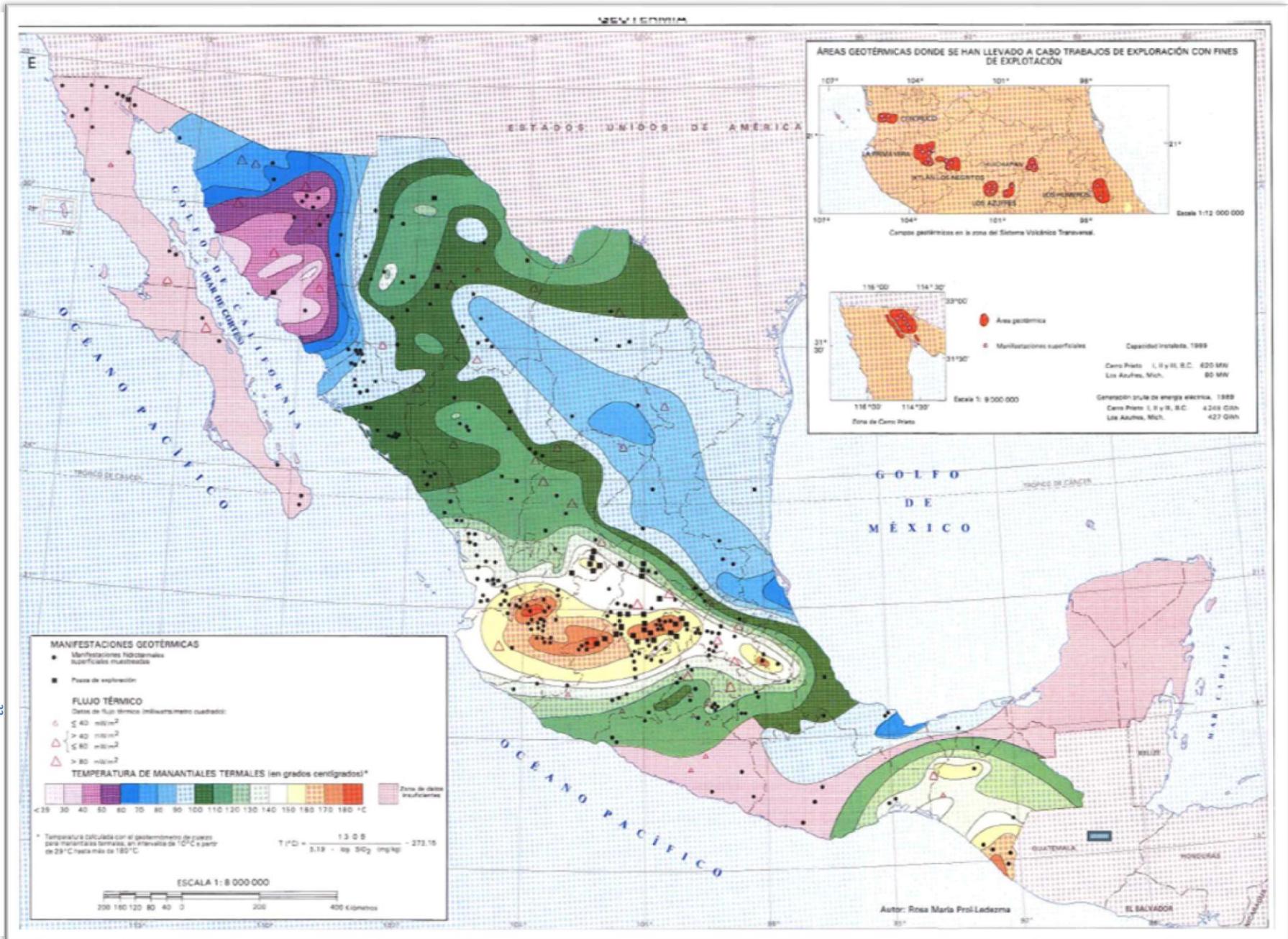
Estas desventajas son las principales que evitan el desarrollo de las BCG en ciertos países como México donde una fuerte inversión inicial carece de aceptación a pesar de que tenga un buen periodo de recuperación (como es el caso de las BCG).

7 Trabajo a futuro

Los parámetros operacionales obtenidos mediante el desarrollo mostrado en el presente trabajo permiten realizar una buena selección de la configuración de la BCG, con base en las características y datos disponibles del sistema analizado, sin embargo, si lo que se desea es llevar a cabo el diseño y dimensionamiento para todas las zonas del país, se deben realizar las simulaciones correspondientes para cada zona del país, tomando en cuenta las condiciones climáticas y si se tiene un acuífero o no, así como los materiales diferentes a considerar en cada construcción. Debido a que dependiendo de esto, se obtienen las diferentes configuraciones así como el costo varía dependiendo de estos factores.

La información para la vinculación de los apoyos de vivienda sustentable es un poco difícil de encontrar y el proceso de vinculación es complejo y tardado. Además de que la mayoría de las vinculaciones no consideran tal cual a las BCG. Esto se debe a que las BCG y sus ventajas aún no son muy conocidas en el país. Se debe realizar una vinculación con las entidades correspondientes para facilitar el apoyo económico sobre las BCG. Así como continuar con los trabajos y propagación de información sobre las BCG en México.

8 Anexos





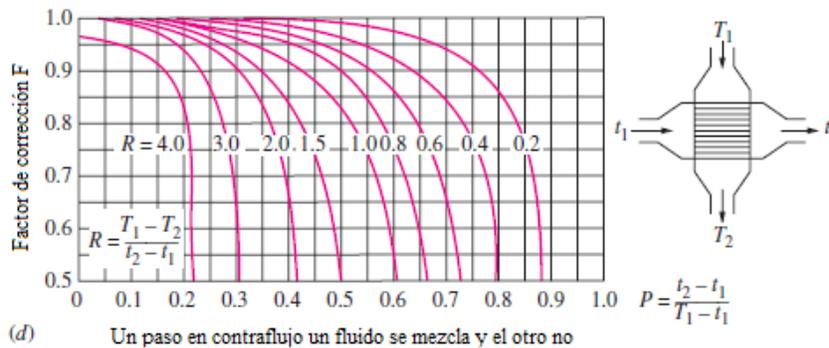
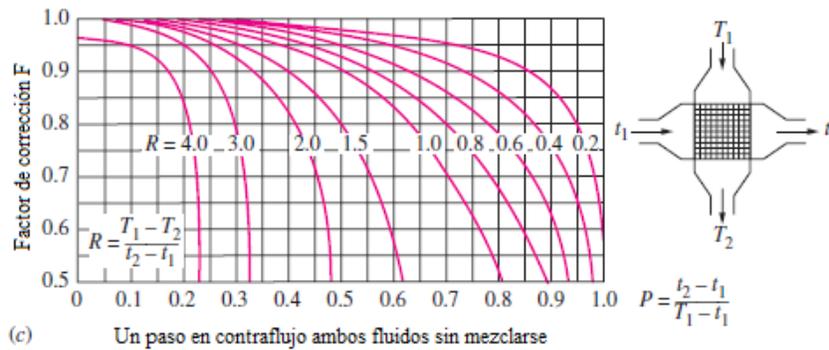
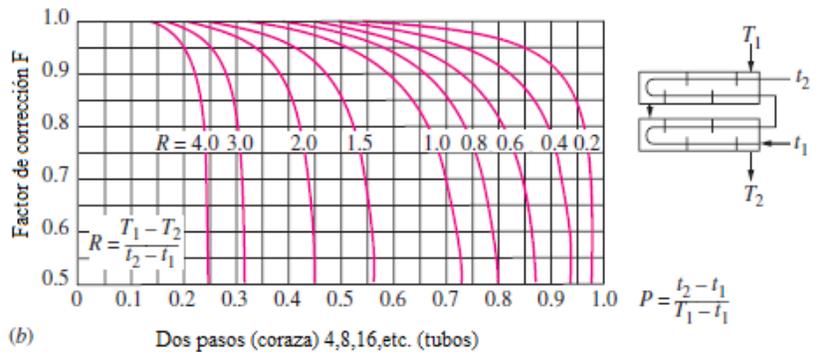
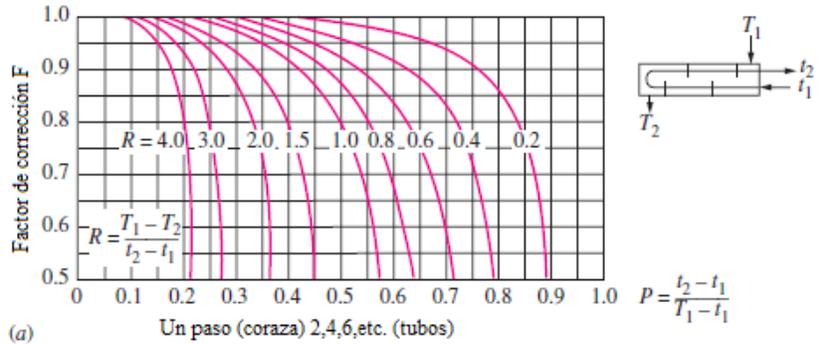
País	Capacidad Instalada [MWth]	Uso Anual [TJ/año]	Unidades de 12 kW*
Estados Unidos	7 200	22 215	600 000
Suecia	3 840	36 000	320 000
China	631	6 569	52 583
Noruega	600	3 085	50 000
Suiza	532.4	2 854	44 367
Canada	435	2 160	36 250
Alemania	400	2 200	33 333
Dinamarca	309	3 940	25 750
Austria	300	1 450	25 000
Finlandia	260	1 950	21 667
Holanda	253.5	685	21 125
República Checa	200	1 130	16 667
Italia	120	500	10 000
Polonia	103.6	574.4	8 633
Bélgica	60	324	5 000
Irlanda	19.6	83.6	1 633
Francia	16.1	468.8	1 342
Reino Unido	10.2	45.6	850
Serbia	6	40	500
Australia	5.5	30	458
Grecia	4	39.1	333
Hungría	4	22.6	333
Islandia	4	20	333
Japon	4	22.4	333
Corea del Sur	3.4	11.9	283
Lituania	3.3	29	275
Eslovenia	3.3	69.9	275
Eslovaquia	1.4	12.1	117
Rusia	1.2	11.5	100
Bielorrusia	1	3.3	83
Bulgaria	0.3	4.4	25
Portugal	0.2	0	17
TOTAL	15 332	86 550.6	1 277 665

***12 kW es el tamaño de una unidad residencial**

Anexo 8-2 Cantidad Instalada de las Bombas de Calor Geotérmicas a Nivel Mundial en el 2005⁷³

⁷² Biblioteca de Conjunta de Ciencias de la Tierra, UNAM. <http://bcct.unam.mx/web/geobase.htm>

⁷³ The advance of geothermal heatpumps, IEA Heat Pump Volume 23, No. 4/2005



Anexo 8-3 Factores de corrección de diferencia de temperaturas media logarítmica para distintas configuraciones⁷⁴

⁷⁴ Rajaratnam Shanthini "Thermodynamics for Beginners" 2009. Science Education Unit



30° Latitud Norte		Hora Solar												
Época	Orientación	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
21 Junio	<i>N</i>	77.3	67.9	42.1	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8	42.1	67.9	77.3
	<i>NE</i>	246	325	304	227	129	44.5	32.8	32.8	32.8	32.8	28.1	23.4	11.7
	<i>E</i>	253	365	377	335	229	103	32.8	32.8	32.8	32.8	28.1	23.4	11.7
	<i>SE</i>	98.3	176	211	211	171	103	39.8	32.8	32.8	32.8	28.1	23.4	11.7
	<i>S</i>	11.7	10	12	14	15	19	21	19	15	14	12	10	5
	<i>SO</i>	11.7	23.4	28.1	32.8	32.8	32.8	39.8	103	171	211	211	176	98.3
	<i>O</i>	11.7	23.4	28.1	32.8	32.8	32.8	32.8	103	229	335	377	365	253
	<i>Horizontal</i>	11.7	23.4	28.1	32.8	32.8	32.8	32.8	44.5	129	227	328	325	246
22 Julio y 21 Mayo	<i>N</i>	77.3	86.6	72.6	79.6	86.6	91.3	93.6	91.3	86.6	79.6	72.6	86.6	77.3
	<i>NE</i>	246	391	382	300	183	101	93.6	101	183	300	382	391	246
	<i>E</i>	262	464	506	457	346	192	98.3	192	346	457	506	464	262
	<i>SE</i>	124	267	339	351	314	232	136	232	314	351	339	267	124
	<i>S</i>	18.7	44.5	65.6	86.6	124	155	166	155	124	86.6	65.6	44.5	18.7
	<i>SO</i>	18.7	42.1	60.9	72.6	81.9	93.6	136	93.6	81.9	72.6	60.9	42.1	18.7
	<i>O</i>	18.7	42.1	60.9	72.6	81.9	89	98.3	89	81.9	72.6	60.9	42.1	18.7
	<i>Horizontal</i>	18.7	42.1	60.9	72.6	81.9	89	93.6	89	81.9	72.6	60.9	42.1	18.7
24 Agosto y 20 Abril	<i>N</i>	28.1	39.8	53.8	65.6	74.9	79.6	81.9	79.6	74.9	65.6	53.8	39.8	28.1
	<i>NE</i>	157	316	295	192	93.6	81.9	81.9	81.9	93.6	192	295	316	157
	<i>E</i>	192	447	506	461	349	190	89	190	349	461	506	447	192
	<i>SE</i>	112	316	421	459	438	365	246	365	438	459	421	316	112
	<i>S</i>	11.7	39.8	93.6	185	272	328	349	328	272	185	93.6	39.8	11.7
	<i>SO</i>	11.7	35.1	51.5	65.6	79.6	122	246	122	79.6	65.6	51.5	35.1	11.7
	<i>O</i>	11.7	35.1	51.5	65.6	74.9	79.6	89	79.6	74.9	65.6	51.5	35.1	11.7
	<i>Horizontal</i>	11.7	35.1	51.5	65.6	74.9	79.6	81.9	79.6	74.9	65.6	51.5	35.1	11.7
22 Septiembre y 22 Marzo	<i>N</i>	0	11.7	23.4	28.1	30.4	32.8	32.8	32.8	30.4	28.1	23.4	11.7	0
	<i>NE</i>	0	173	211	93.6	35.1	32.8	32.8	32.8	30.4	28.1	23.4	11.7	0
	<i>E</i>	0	290	370	337	241	112	32.8	32.8	30.4	28.1	23.4	11.7	0
	<i>SE</i>	0	229	307	356	330	265	157	58.5	30.4	28.1	23.4	11.7	0
	<i>S</i>	0	21.1	42.1	140	192	229	246	229	192	140	42.1	21.1	0
	<i>SO</i>	0	11.7	23.4	28.1	30.4	58.5	157	265	330	356	330	229	0
	<i>O</i>	0	11.7	23.4	28.1	30.4	32.8	32.8	32.8	30.4	28.1	23.4	11.7	0
	<i>Horizontal</i>	0	58.5	190	316	419	473	496	473	419	316	190	58.5	0
22 Octubre y 20 Febrero	<i>N</i>	0	7.02	18.7	25.8	28.1	30.4	32.8	30.4	28.1	25.8	18.7	7.02	0
	<i>NE</i>	0	77.3	91.3	42.1	28.1	30.4	32.8	30.4	28.1	25.8	18.7	7.02	0
	<i>E</i>	0	185	316	309	220	101	32.8	30.4	28.1	25.8	18.7	7.02	0
	<i>SE</i>	0	171	332	382	372	318	215	110	35.1	25.8	18.7	7.02	0
	<i>S</i>	0	42.1	133	215	283	325	339	325	283	215	133	42.1	0
	<i>SO</i>	0	7.02	18.7	25.8	35.1	110	215	318	372	382	332	171	0
	<i>O</i>	0	7.02	18.7	25.8	28.1	30.4	32.8	101	220	309	316	185	0
	<i>Horizontal</i>	0	7.02	18.7	25.8	28.1	30.4	32.8	30.4	28.1	42.1	91.3	77.3	0
21 Noviembre y 21 Enero	<i>N</i>	0	2.34	14	21.1	25.8	28.1	28.1	28.1	25.8	21.1	14	2.34	0
	<i>NE</i>	0	18.7	37.5	21.1	25.8	28.1	28.1	28.1	25.8	21.1	14	2.34	0
	<i>E</i>	0	63.2	255	272	194	81.9	28.1	28.1	25.8	21.1	14	2.34	0
	<i>SE</i>	0	65.6	297	377	379	335	243	150	53.8	21.1	14	2.34	0
	<i>S</i>	0	23.4	159	255	321	361	372	361	321	255	201	23.4	0
	<i>SO</i>	0	2.34	14	21.1	53.8	150	243	335	379	377	297	65.6	0
	<i>O</i>	0	2.34	14	21.1	25.8	28.1	28.1	81.9	194	272	255	63.2	0
	<i>Horizontal</i>	0	2.34	14	21.1	25.8	28.1	28.1	28.1	25.8	21.1	37.5	18.7	0
22 Diciembre	<i>N</i>	0	0	9.36	21.1	25.8	28.1	28.1	28.1	25.8	21.1	9.36	0	0
	<i>NE</i>	0	0	23.4	21.1	25.8	28.1	28.1	28.1	25.8	21.1	9.36	0	0
	<i>E</i>	0	0	215	246	187	74.9	28.1	28.1	25.8	21.1	9.36	0	0
	<i>SE</i>	0	0	267	368	379	335	253	169	4.68	21.1	9.36	0	0
	<i>S</i>	0	0	150	285	332	372	382	372	332	285	150	0	0
	<i>SO</i>	0	0	9.36	21.1	65.6	169	253	335	379	368	267	0	0
	<i>O</i>	0	0	9.36	21.1	25.8	28.1	28.1	74.9	187	246	215	0	0
	<i>Horizontal</i>	0	0	9.36	21.1	25.8	28.1	28.1	28.1	25.8	21.1	23.4	0	0

Anexo 6. Ganancia de calor solar a través de cristales (Kilocalorías por hora por metro cuadrado)⁷⁵

⁷⁵ Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración, Eduardo Hernández Goribar, Ed. Limusa 1973

Latitud Norte	Tiempo Solar								
	A.M			P.M					
	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Pared hacia:	Color Exterior de la			Pared Blanca					
NE	1	1	1	4	4	3	4	6	4
E	3	3	4	6	6	4	6	6	6
SE	2	2	2	6	7	7	6	6	6
S	1	1	1	1	3	6	7	6	4
SO	2	2	2	2	3	4	7	9	8
O	2	2	3	3	3	4	5	9	9
NO	1	1	1	1	2	3	4	8	8
N	0	0	0	0	1	3	4	4	3

Techos expuestos a Sol. Construcción pesada									
Concreto de 6" y aislante	8	10	12	14	16	18	20	22	24
	3	3	11	19	23	24	19	11	8

Anexo 7 Ganancia de calor solar a través de muros y techos expuestos al sol (Kilocalorías por hora por metro cuadrado)⁷⁶

Trane XB300 AC

$$W = (\text{BTU} / \text{h}) \div \text{SEER}$$



Capacidad	Eficiencia	Nivel de sonido	Carga térmica	Precio (Instalado)
1.5 Tons	13.00 SEER	83 db	24,000 btu/h	\$3256.00
2.0 Tons	13.00 SEER	81 db	24,000 btu/h	\$3368.00
2.5 Tons	13.00 SEER	83 db	36,000 btu/h	\$3716.00
3.0 Tons	13.00 SEER	83 db	36,000 btu/h	\$4032.00
3.5 Tons	13.25 SEER	82 db	48,000 btu/h	\$4234.00
4.0 Tons	13.25 SEER	83 db	48,000 btu/h	\$4442.00
5.0 Tons	13.00 SEER	83 db	72,000 btu/h	\$5156.00

Anexo 8 Catálogo de aire acondicionado para alta carga térmica⁷⁷

⁷⁶ *Ibidem*

⁷⁷ Cortesía de aricoplumbing



Temperatura		Refrigerante						Temperatura		Refrigerante				
°F	°C	R-22	R-410a	R-407c	R-134a	R-404a		°F	°C	R-22	R-410a	R-407c	R-134a	R-404a
-60	-51.1	11.9	0.9	16.0	21.6	-	27	-2.8	51.2	91.6	44.7	23.7	66.2	
-55	-48.3	9.2	1.8	13.7	20.2	-	28	-2.2	52.4	93.5	45.9	24.5	67.7	
-50	-45.6	6.1	4.3	11.1	18.6	-	29	-1.7	53.7	95.5	47.1	25.3	69.2	
-45	-42.8	2.7	7.0	8.1	16.7	-	30	-1.1	54.9	97.5	48.4	26.1	70.7	
-40	-40.0	0.6	10.1	4.8	14.7	4.9	31	-0.6	56.2	99.5	49.6	26.9	72.1	
-35	-37.2	2.6	13.5	1.1	12.3	7.5	32	0.0	57.5	101.6	50.9	27.8	73.8	
-30	-34.4	4.9	17.2	1.5	9.7	10.3	33	0.6	58.8	103.6	52.1	28.6	75.3	
-25	-31.7	7.5	21.4	3.7	6.8	13.5	34	1.1	60.2	105.7	53.4	29.5	76.9	
-20	-28.9	10.2	25.9	6.2	3.6	16.8	35	1.7	61.5	107.9	54.8	30.4	78.5	
-18	-27.8	11.4	27.8	7.2	2.2	18.3	36	2.2	62.9	110.0	56.1	31.3	80.2	
-16	-26.7	12.6	29.7	8.4	0.7	19.8	37	2.8	64.3	112.2	57.5	32.2	81.7	
-14	-25.6	13.9	31.8	9.5	0.4	21.3	38	3.3	65.7	114.4	58.9	33.1	83.5	
-12	-24.4	15.2	33.9	10.7	1.2	22.9	39	3.9	67.1	116.7	60.3	34.1	85.2	
-10	-23.3	16.5	36.1	11.9	2.0	24.6	40	4.4	68.6	118.9	61.7	35.0	86.9	
-8	-22.2	17.9	38.4	13.2	2.8	26.3	41	5.0	70.0	121.2	63.1	36.0	88.6	
-6	-21.1	19.4	40.7	14.6	3.7	28.0	42	5.6	71.5	123.6	64.6	37.0	90.4	
-4	-20.0	20.9	43.1	15.9	4.6	29.8	43	6.1	73.0	125.9	66.1	38.0	92.2	
-2	-18.9	22.4	45.6	17.4	5.5	31.7	44	6.7	74.5	128.3	67.6	39.0	94.0	
0	-17.8	24.0	48.2	18.9	6.5	33.7	45	7.2	76.1	130.7	69.1	40.0	95.8	
1	-17.2	24.8	49.5	19.6	7.0	34.7	46	7.8	77.6	133.2	70.6	41.1	97.6	
2	-16.7	25.7	50.9	20.4	7.5	35.7	47	8.3	79.2	135.6	72.2	42.2	99.5	
3	-16.1	26.5	52.2	21.2	8.0	36.7	48	8.9	80.8	138.2	73.8	43.2	101.4	
4	-15.6	27.4	53.6	22.0	8.6	37.7	49	9.4	82.4	140.7	75.4	44.3	103.3	
5	-15.0	28.3	55.0	22.8	9.1	38.8	50	10.0	84.1	143.3	77.1	45.4	105.3	
6	-14.4	29.1	56.4	23.7	9.7	39.8	55	12.8	92.6	156.6	106.0	51.2	115.3	
7	-13.9	30.0	57.9	24.5	10.2	40.9	60	15.6	101.6	170.7	116.2	57.4	126.0	
8	-13.3	31.0	59.3	25.4	10.8	42.0	65	18.3	111.3	185.7	127.0	64.0	137.4	
9	-12.8	31.9	60.8	26.2	11.4	43.1	70	21.1	121.5	201.5	138.5	71.1	149.3	
10	-12.2	32.8	62.3	27.1	12.0	44.3	75	23.9	132.2	218.2	150.6	78.6	161.9	
11	-11.7	33.8	63.9	28.0	12.6	45.4	80	26.7	143.7	235.9	163.5	86.7	175.4	
12	-11.1	34.8	65.4	29.0	13.2	46.6	85	29.4	155.7	254.6	177.0	95.2	189.6	
13	-10.6	35.8	67.0	29.9	13.8	47.8	90	32.2	168.4	274.3	191.3	104.3	204.5	
14	-10.0	36.8	68.6	30.9	14.4	49.0	95	35.0	181.9	295.0	206.4	113.9	220.2	
15	-9.4	37.8	70.2	31.8	15.1	50.2	100	37.8	196.0	316.9	222.3	124.1	236.8	
16	-8.9	38.8	71.9	32.8	15.7	51.5	105	40.6	210.8	339.9	239.0	134.9	254.2	
17	-8.3	39.9	73.5	33.8	16.4	52.7	110	43.3	226.4	364.1	256.5	146.3	272.5	
18	-7.8	40.9	75.2	34.8	17.1	54.0	115	46.1	242.8	389.6	274.9	158.4	291.9	
19	-7.2	42.0	77.0	35.9	17.7	55.3	120	48.9	260.0	416.4	294.2	171.1	312.1	
20	-6.7	43.1	78.7	36.9	18.4	56.6	125	51.7	278.1	444.5	314.5	184.5	333.4	
21	-6.1	44.2	80.5	38.0	19.2	57.9	130	54.4	297.0	474.0	335.7	198.7	355.6	
22	-5.6	45.3	82.3	39.1	19.9	59.3	135	57.2	316.7	505.0	357.8	213.5	379.1	
23	-5.0	46.5	84.1	40.2	20.6	60.6	140	60.0	337.4	537.6	380.9	229.2	403.7	
24	-4.4	47.6	85.9	41.3	21.4	62.0	145	62.8	359.1	571.7	405.1	245.6	429.6	
25	-3.9	48.8	87.8	42.4	22.1	63.4	150	65.6	381.7	607.6	430.3	262.8	456.8	
26	-3.3	50.0	89.7	43.6	22.9	64.8	155	68.3	405.4	645.2	456.6	281.0	484.8	

Anexo 8 Tablas de temperatura y presión para distintos refrigerantes⁷⁸

⁷⁸ Cortesía de Advantage engineering

9 Bibliografía

Acercando el IMSS al ciudadano [En línea] / aut. Social Instituto Mexicano del Seguro. - I.M.S.S., 2013. - 01 de 06 de 2013. - <http://www.imss.gob.mx/>.

Advantage Engineering, Inc. [En línea] / aut. Engineering Advantage. - 2013. - Mayo de 1 de 2013. - www.advantageengineering.com.

An information survival kit for the prospective residential geothermal heat pump owner [Publicación periódica] / aut. Rafferty Kevin. - [s.l.] : Geo-Heat Center.

AN INFORMATION SURVIVAL KIT FOR THE PROSPECTIVE RESIDENTIAL GEOTHERMAL HEAT PUMP OWNER [Publicación periódica] / aut. Rafferty Kevin. - [s.l.] : Geo-Heat Center.

Biblioteca de Conjunta de Ciencias de la Tierra [En línea] / aut. U.N.A.M.. - 2013. - Febrero de 3 de 2013. - <http://bcct.unam.mx/web/geobase.htm>.

Centro de Investigaciones en Energía [En línea] / aut. Energía Centro de Investigaciones en. - Enero de 22 de 2013. - www.cie.unam.mx.

Comisión Federal de Electricidad [En línea]. - 2013. - 21 de Enero de 2013. - www.cfe.gob.mx.

Comisión Nacional para la Vivienda [En línea] / aut. CONAVI. - 2013. - 02 de 06 de 2013. - <http://www.conavi.gob.mx/programas-estrategicos/tu-casa/tu-casa-mejoramiento-vivienda>.

Condiciones de confort a partir del intercambio térmico con el suelo [Publicación periódica] / aut. Velasco Ing. Raúl Sánchez. - [s.l.] : Asociación Geotérmica Mexicana.

Current Status of Geothermics in Mexico [Publicación periódica] / aut. Luis C.A. Gutiérrez-Negrín Raúl Maya-González and José Luis Quijano-León // Proceedings World Geothermal Congress. - 2010.

DESIGN OF SMALL FRUIT DRIER USING GEOTHERMAL ENERGY [Publicación periódica] / aut. Lund. John W.. - [s.l.] : Geo-Heat Center Bulletin, 1996.

Direct Use Activity in México [Publicación periódica] / aut. Lund John W.. - [s.l.] : Geo-Heat Center Bulletin, 1991.

Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review [Informe] / aut. John W. Lund Derek H. Freeston, Tonya L. Boyd. - [s.l.] : Proceedings World Geothermal Congress, 2010.

EDENOR [En línea] / aut. EDENOR. - 2013. - Marzo de 8 de 2013. - www.edenor.com.ar.

Estadísticas climatológicas del estado de Baja California (Periodo 1961-2003) [Informe] / aut. José Ariel Ruiz Corral Gabriel Díaz Padilla, Sergio Decarlo Guzmán Ruíz, Guillermo Medina García, Mario Marín Silva Serna. - [s.l.] : Centro de Investigación regional del noroeste, 2003.

Estado actual de desarrollo de las Bombas de Calor Geotérmico [Publicación periódica] / aut. Estrella Alfonso García Gutiérrez e Ignacio Martínez. - [s.l.] : Revista Mexicana de Geoenergía. - 2 : Vol. 25.

Estado actual de desarrollo de las Bombas de Calor Geotérmico [Publicación periódica] / aut. Estrella Alfonso García Gutiérrez e Ignacio Martínez. - [s.l.] : Revista geotérmica mexicana. - 2 : Vol. 25.

Fundamentals of engineering thermodynamics [Libro] / aut. Moran J. Shapiro N.M.. - [s.l.] : Wiley, 2006.

Geoconsult Ingenieros Consultores, S.A. [En línea]. - 2013. - Marzo 22 de 2013. - <http://www.geoconsult.es/>.

Geotermia.org.mx [En línea] / aut. Mexicana Asociación Geotérmica. - www.geotermia.org.mx.

Geothermal: International Market Overview Report [Publicación periódica] / aut. Association Geothermal Energy. - 2012.

GROUND-COUPLING WITH WATER SOURCE HEAT PUMPS [Publicación periódica] / aut. Kavanaugh Steve. - Tuscaloosa, Alabama : The University of Alabama.

Haet transfer enhancement in cross-flow heat exchangers using oval tubes and multiple delta winglets [Publicación periódica] / aut. S. Tiwari D. Maurya, G. Biswas.

Heat pump technology [Libro] / aut. Hans Ludwig con Cube Fritz Steimle, E.G.A Goodall. - [s.l.] : Butterworths, 1981.

Heat Pump Technology [Libro] / aut. Langley Billy C. - [s.l.] : Prentice-Hall.

Historia de la Geotermia [Conferencia] / aut. Jiménez M. en I. Héctor Aviña // Temas Selectos de Termofluidos. - 2012.

Hydrogeothermal Cascade Heat Pump [Conferencia] / aut. D. Goričanec A. Saljnikov,, D. Antonijevic, J. Kropel and M. Komatina // International Conference on Renewable Energies and Power. - Valencia (Spain) : [s.n.], 2009.

Independent Statistics & Analysis [En línea] / aut. Administration U.S. Energy Information. - 2013. - 05 de Junio de 2013.

Independent Statistics and Analysis [Publicación periódica] / aut. Admission US Energy Information. - 2013.

International Energy Statistics [En línea] / aut. Statistics International Energy. - 2013. - 21 de Marzo de 2013. - <http://www.iea.org/stats/>.

Key World Energy Statistics [Informe] / aut. International Energy Agency. - 2011.

Mitchell mechanical Heating & Air conditioning, Inc. [En línea]. - 2013. - 15 de Febrero de 2013. - www.mitchellmechanical.com.

MUSHROOM GROWING PROJECT AT THE LOS HUMEROS [Informe] / aut. Rangel María Elena Rangel. - [s.l.] : Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad, 1998.

Ningbo Sanheng Refrigeration Control Co., Ltd [En línea]. - 2013. - 1 de Abril de 2013. - www.nbsanheng.com/en/index.asp.

Planos de casas gratis [En línea] / aut. casas Planos de. - 2013. - 01 de 06 de 2013. - <http://planosde.com.ar/>.

Plumbing heating and cooling [En línea] / aut. plumbing ARICO. - 2013. - 02 de Junio de 2013.

Prospectiva del Sector Eléctrico 2009-2024 [Informe] / aut. Secretaria de Energía. - 2009.

Resumen de la evaluación 2010 de los recursos geotérmicos mexicanos de temperatura intermedia baja [Informe] / aut. Eduardo R. Iglesias Rodolfo J. Torres, J. Ignacio Martínez-Estrella y Neftalí Reyes-Picass. - [s.l.] : Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2010.

RYE Home Energy Consulting & House Planning [En línea] / aut. Rye Phillip. - 2013. - 1 de Junio de 2013. - <http://www.dougyrye.com/geothermal-heat-pump-cost-per-ton.html>.

Summary table of geothermal direct uses [Informe] / aut. Gutiérrez-Negrín Luis C.A.. - [s.l.] : Geocónsul, 2010.

Systems and Sustainability "POWER FOR A SUSTAINABLE FUTURE" [Libro] / aut. Godfrey Boyle Bob Everett and Janet Ramage. - [s.l.] : Oxford University Press.

Tectonics Observatory [En línea] / aut. CALTECH. - 2013. - 22 de Febrero de 2013. - www.tectonics.caltech.edu.

The advance of geothermal heatpumps [Publicación periódica] / aut. Agency International Energy. - 2005. - 4 : Vol. 23.

Thermodynamics for Beginners [Libro] / aut. Shanthini Rajaratnam. - [s.l.] : Science Education Unit, 2009.

Verdeate [En línea] / aut. Verdeate. - 2013. - Mayo de 30 de 2013. - <http://www.verdeate.com/articulos/62-bajale-al-aire-acondicionado>.