

Calefacción y Refrigeración con Bombas de Calor – Proyectos desarrollados en México

Fernando Rivas-Cruz ^{1,2,*}, Eduardo Gamaliel Hernández-Martínez ² y Luis Enrique Papadimitriou-Suarez del Real ³

¹ Gerencia de Geotermia, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Reforma 113, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, México 62490

² Instituto de Investigación Aplicada y Tecnología, Universidad Iberoamericana, Prolongación Paseo de la Reforma 880, CDMX, México 0121

³ Departamento de proyectos, Geoter Renovables de México, Sierra Morena #122-9A, Bosques del Prado, Ags., Aguascalientes, México 20127

* Autor de correspondencia: fernando.rivas@ineel.mx, fernando.rivas.cruz@gmail.com

Recibido: 13 de septiembre de 2021

Aceptado: 26 de septiembre de 2021

Resumen: En este artículo se presenta un extenso trabajo de investigación sobre los sistemas de bombas de calor que funcionan con energía geotérmica y aerotérmica desarrollados en México. Se da una descripción de siete sistemas principales: (a) una bomba de calor agua-aire para un kínder y una bomba de calor tipo combo agua-aire y agua-agua para una clínica del IMSS, ambos sistemas diseñados para calefacción ubicados en Los Humeros, Puebla; (b) tres bombas de calor agua-aire para refrigerar/caleentar dos laboratorios en Mexicali, BC; (c) una bomba de calor agua-aire para refrigerar una sala de juntas en Cuernavaca, Morelos; (d) un sistema de bomba de calor agua-agua para un club campestre y cuatro bombas de calor aire-aire para un Hotel, ambos sistemas fueron diseñados para refrigerar/caleentar los edificios y se localizan en Aguascalientes, Aguascalientes; y (e) un sistema híbrido con una bomba de calor aire-aire que incluye el uso de energía solar fotovoltaica localizado en León, Guanajuato.

Palabras clave: bombas de calor; geotermia; aerotermia; calefacción; refrigeración.

Heating and Cooling with Heat Pumps – Projects developed in Mexico

Abstract: This article presents extensive research work on geothermal and aerothermal heat pump systems developed in Mexico. Seven systems are presented: (a) water-water geothermal heat pump for a kindergarten and a water-air and water-water combo geothermal heat pumps for a Hospital for the Mexican Social Security Institute (IMSS) at Los Humeros community in Puebla, both systems working for heating; (b) three water-air geothermal heat pumps for heating/cooling for a laboratory complex at Mexicali B.C.; (c) one water-air geothermal heat pump for cooling for a meeting room at Cuernavaca Morelos; (d) two water-water geothermal heat pumps for pool heating at a Sports Club, and four air-water aerothermal heat pumps for cooling/heating and water heating at a hotel in Aguascalientes, Aguascalientes; and (e) a hybrid system composed of two air-water aerothermal heat pumps and a photovoltaic system in León, Guanajuato.

Keywords: heat pumps; geothermal; aerothermal; heating; cooling.

Introducción

Una bomba de calor (BC) es una máquina térmica que su operación se basa en la termodinámica, es decir, transportar energía en forma de calor de un ambiente a otro, dicho de otra forma, trabaja igual que un refrigerador, la diferencia radica en el uso deseado. El refrigerador se usa para enfriar un espacio, mientras que una bomba de calor proporciona calefacción o refrigeración utilizando la misma máquina. La bomba de calor tiene diferentes fuentes de energía (suelo, agua, aire), de estas fuentes, transfiere la energía en forma de calor hacia los espacios a acondicionar, todo a través de un sistema de distribución que puede ser radiadores, fancoil o ductos. Si la fuente de calor es el subsuelo o agua, el sistema se denomina Bomba de Calor Geotérmica (SBCG) y si la fuente de calor es el aire, entonces el sistema se denomina Bomba de Calor Aerotérmica (SBCA).

El uso de estos sistemas ha crecido en todo el mundo durante las últimas décadas, ya que por sus características tienen un consumo menor de electricidad y su mantenimiento es menor que la de otros sistemas como por ejemplo las calderas de gas. Representa el 71.6% de la capacidad instalada y el 59.2% del uso anual de energía en todo el mundo. La capacidad instalada es de 77,547 MWt y el uso de energía es de 599,981 TJ / año, con un factor de capacidad de 0.245 en el modo de calefacción. La mayoría de las instalaciones ocurren en América del Norte, Europa y China, aunque el número de países con usar esta tecnología se ha incrementado: 26 en 2000, 33 en 2005, 43 en 2010, 48 en 2015 y a 54 en 2020 (Lund and Toth, 2021).

Omer (2008) indica que el consumo energético en edificios a nivel mundial es de aproximadamente el 40% de la energía total anual y que más de la mitad del consumo de esta energía es por sistemas de aire acondicionado (Zhai et al., 2011),

es por esto, que globalmente el consumo de energía podría duplicarse en los próximos años de acuerdo a las tendencias actuales de refrigeración. Este aumento en la demanda de energía podría impactar de forma negativa al medio ambiente. Una de las soluciones que plantea Figueroa et al., (2010) en las edificaciones: es disminuir su demanda de energía, reducir los impactos ambientales y que las condiciones en el interior de sus espacios se mantengan confortables con respecto a cambios en la temperatura exterior. Sin embargo, de continuar usando equipos convencionales de refrigeración (chillers) en estas edificaciones, se corre el riesgo de seguir aumentando la demanda de consumo de energía.

En México, predomina el clima cálido, y en algunas regiones del norte y otras partes montañosas del país, se presentan climas estacionales a temperaturas bajas, esto ha provocado aumentar la importancia en el consumo de energía para el confort de los ocupantes de edificios de los sectores residencial y comercial (De Buen, 2005). De acuerdo con SENER (2010), del total del consumo de energía eléctrica en 2009 a nivel nacional por parte de los sectores residencial, comercial y público representó el 27.8% o 25.8 TJ (177.2, 48.5 y 28.1 TJ, respectivamente). Como se ve, el sector residencial es el que consume más energía, y su consumo de electricidad se ha incrementado de 130.06 TJ en el año 2000 a 153.11 en 2005 y a 177.2 en 2009, destinándola principalmente a la refrigeración y acondicionamiento de espacios.

La bomba de calor es una tecnología con muchas características que podría usarse en diversas áreas (comercios, establecimientos, hospitales, viviendas, etc.) en nuestro país, debido a su alta eficiencia, ahorro de energía y a la protección al medio ambiente, ya que las emisiones de CO₂ son menores que cualquier otro sistema de calefacción por combustión y menor consumo de electricidad por refrigeración. En el presente trabajo se describen las características principales de las BC, sus aplicaciones en diversos sectores y su estado actual de desarrollo y aplicación de estos sistemas en México.

Metodología

Teoría de las bombas de calor

Se define como bomba de calor (BC) a una máquina térmica que opera de la misma forma que un refrigerador, pero a la inversa: es decir, el diseño de un refrigerador tiene la finalidad de enfriar. La BC puede proporcionar calefacción y refrigeración de espacios, con el mismo equipo, aprovechando fuentes de energía externas y gratuitas como el suelo, aire y el agua, los cuales llamaremos sumideros. Estos equipos son altamente eficientes ya que por cada kW eléctrico que consume la bomba de calor, 3 o 4 kW es energía térmica suministrada por cualquiera de los sumideros, esto es una gran ventaja, ya que permite que existan ahorros de electricidad del 30 al 70% respecto a otros sistemas de calentamiento tradicional usando gas o electricidad. La bondad del uso de esta tecnología se relaciona directamente con beneficios ambientales, la reduciendo de la demanda eléctrica de la red, el uso de energías renovables, el uso de refrigerantes respetuosos con el medio ambiente y a la contribución en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La Figura 1 muestra un esquema de una bomba de calor las partes principales: (1) la fuente/sumidero de calor, (2) la bomba de calor y (3) el espacio a acondicionado:

1. La fuente o sumidero de calor que puede ser el aire, agua o el subsuelo. Dicho en otras palabras, es el intercambiador de calor.
2. La propia BC que es una máquina que opera como un refrigerador, pero a la inversa: en el evaporador se provoca un efecto de enfriamiento y en el condensador un efecto de calentamiento. Puede operar para proporcionar refrigeración, calefacción, así como de suministro de agua caliente sanitaria (ACS). Para operar en modo refrigeración o calefacción, la BC esta provista de una válvula reversible (Figura 2), y su conexión a la fuente o sumidero.
3. El espacio a acondicionado que es una edificación, un espacio, un comercio, etc., con un sistema de distribución de aire o agua caliente, alimentado a las condiciones de temperatura y humedad requeridas.

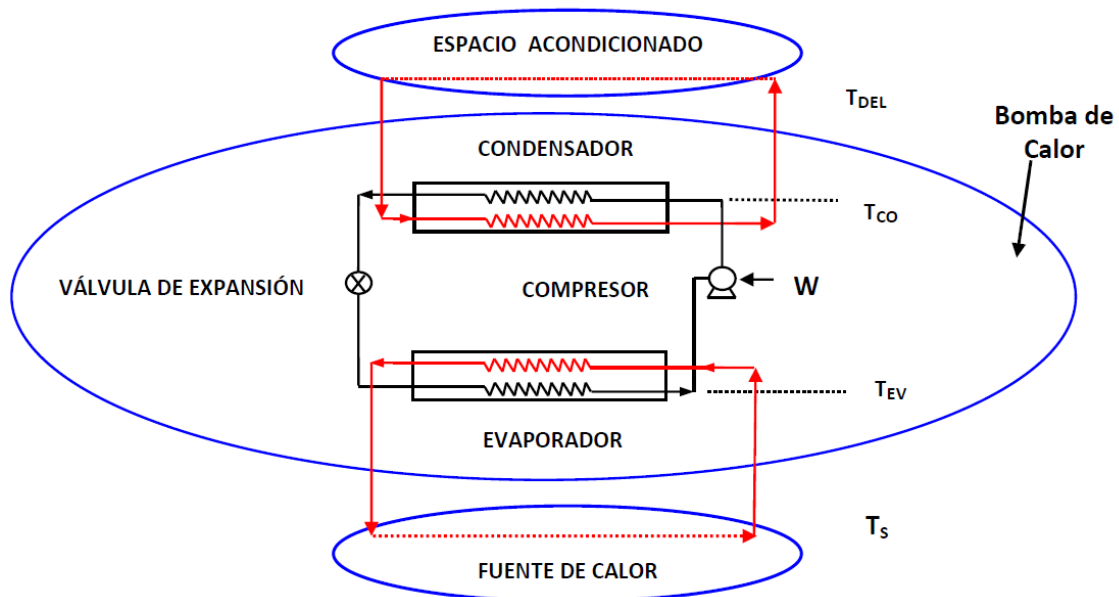


Figura 1. Diagrama esquemático de una bomba de calor, (García y Martínez, 2012).

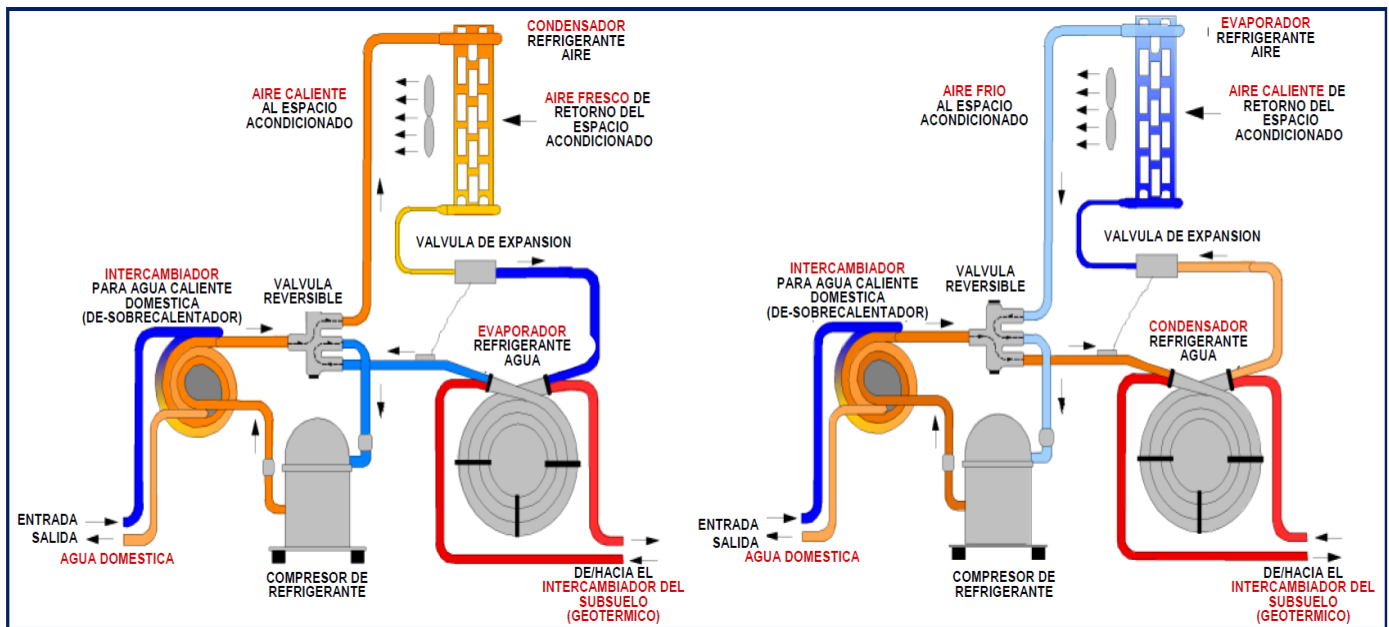


Figura 2. Operación de BC en modo calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha), (adaptada de Lund, 2007).

Eficiencia de las bombas de calor

La eficiencia de una bomba de calor se calcula de dos formas, para modo calefacción, se mide través del Coeficiente de Rendimiento COP (por sus siglas en inglés *Coefficient of performance*), el cual se define como el cociente entre la energía térmica cedida por el sistema (Q_{cal}) y la energía eléctrica consumida por el compresor (W_{comp}) bajo condiciones específicas de temperatura y con el equipo térmico a plena carga.

$$COP = \frac{Q_{cal}}{W_{comp}} \quad (1)$$

Para el modo refrigeración, la eficiencia de la bomba de calor se mide a través del EER (siglas en inglés *Energy Efficiency Rating*), la cual corresponde al cociente entre la energía térmica absorbida por el sistema (Q_{ref}) y el consumo eléctrico generado por el compresor (W_{comp}) en condiciones específicas de temperatura y en operación a plena capacidad.

$$EER = \frac{Q_{ref}}{W_{comp}} \quad (2)$$

Clasificación de las bombas de calor

Las bombas de calor se clasifican según la fuente o sumidero de donde se extrae el calor: si extrae el calor de la superficie se denomina Sistema de Bomba de Calor Geotérmica (SBCG). La segunda se clasifica como Sistema de Bomba de Calor Aerotérmica (SBCA) debido a que extraen calor del aire ambiental. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de las fuentes o sumideros existentes en una bomba de calor. Como se observa, la parte significativa de la energía que usa la bomba de calor proviene del medio ambiente exterior, razón por la cual los índices de eficiencia de las bombas de calor son superiores a la unidad. Tanto las bombas de calor geotérmicas como las aerotérmicas pueden transportar la energía térmica a un medio que puede ser aire o agua, a partir de lo cual se obtiene la siguiente clasificación:

Sistemas de Bombas de Calor Geotérmicas (SBCG):

- Sistemas agua-aire
- Sistemas agua-agua
- Sistemas tierra-aire
- Sistemas tierra-agua

Sistemas de Bombas de Calor Aerotérmicas (SBCA):

- Sistemas aire-aire
- Sistemas aire-agua

La implementación de cualquier de estos sistemas depende de la aplicación que quiera llevarse a cabo, la potencia de enfriamiento o calentamiento necesaria y del área o espacio que se va acondicionar.

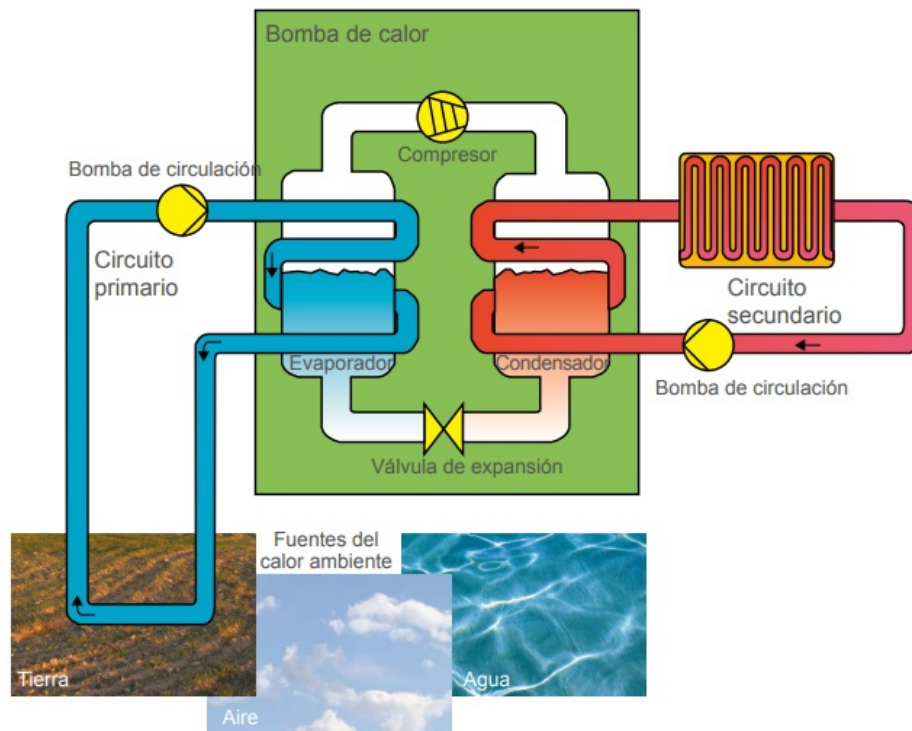


Figura 3. Esquema de operación de una bomba de calor con diferentes sumideros, (IDEA, 2014)

Sistemas de Bombas de Calor Geotérmicas (SBCG)

De las fuentes térmicas principales para este sistema, el calor o energía se obtiene a través de una serie de tuberías, que típicamente son de material HDPE $\frac{3}{4}$ " Polietileno de Alta densidad (*High-density polyethylene*) y que son enterradas en el subsuelo o introducidas en las fuentes hídricas. A esta red de tuberías se les conoce como el intercambiador de calor. Para los SBCG, los intercambiadores de calor se dividen en dos tipos: de circuito abierto y de circuito cerrado.

Intercambiadores de calor de Circuito Abierto

Un sistema de intercambiador de calor de circuito abierto funciona haciendo circular agua subterránea, bombeada desde una fuente de agua, a través de la bomba de calor para extraer calor. Después de la transferencia del calor, el agua que sale de la bomba de calor se descarga en desagües, aguas subterráneas o cuerpos de agua superficiales, o puede ser útil para otros fines como riego, consumo, etc (Singh et al. 2019). En la Figura 4 se muestra las diferentes configuraciones.

En la Figura 4A, la bomba de calor está conectada a un pozo de entrada y a un pozo de descarga. Una vez que el calor se transfiere a la bomba de calor, la temperatura inicial del agua disminuye entre 5 y 7 ° C y el agua se descarga. En verano, el sistema se puede invertir, proporcionando refrigeración para el edificio.

En la Figura 4B, se muestra la segunda, en este caso, la bomba de calor extrae agua de un pozo de entrada, la hace circular y la bombea hacia un punto de descarga, es decir, una masa de agua en la superficie.

En el tercer caso que se muestra en la Figura 4C, el agua se extrae de una estructura inundada subterránea, se hace circular a través de la bomba de calor para extraer calor y se descarga a un cuerpo de agua superficial (Athresh et al., 2016)

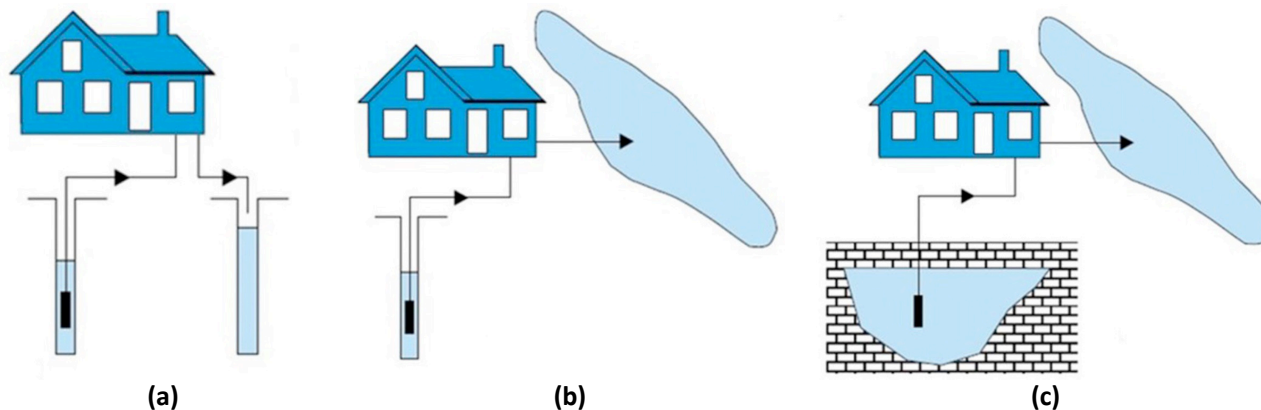


Figura 4. Configuración de intercambiadores de calor de circuito abierto (Singh et al. 2019)

Intercambiadores de calor de Circuito Cerrado

Un sistema de intercambiador de calor de circuito cerrado utiliza y hace circular un volumen constante de fluido portador de calor (FPC), (en este caso puede ser agua o una mezcla de agua con anticongelante dependiendo del punto de congelación del lugar) dentro de una red de tuberías de plástico cerrada instalada en estructuras subterráneas o enterradas a cierta profundidad debajo de la superficie del suelo. El intercambio de calor entre el suelo y la tubería se realiza a través de un contacto indirecto en comparación con los sistemas de circuito abierto. El calor se transfiere desde el suelo a través de las tuberías por conducción, y se transporta a la bomba de calor a través de la circulación de FPC, por convección y conducción.

De este tipo de intercambiador, se puede conectar con diferentes tipos de configuraciones como se muestra en la Figura 5A-F. En la configuración de la Figura 5A, las tuberías de HDPE se colocan horizontalmente en el suelo debajo de la zona de influencia de las heladas. Esto suele ocurrir a una profundidad que oscila entre 1,5 y 2,0 m. (Preene and Powrie, 2009).

En la Figura 5B, se muestra la configuración conocida como tipo slinky (espirales), la forma de instalación es similar a la horizontal. Esta forma permite que se incorpore una longitud de tubería más larga en la zanja horizontal (Kovačević et al., 2013). Existe una variante de esta configuración que es usar slinkies en zanjas verticales, como se muestra en la Figura 5C. En este caso cada slinky se instala a una profundidad que varía entre 2 y 5 m. La distancia entre cada slinky debe ser de entre unos 3 a 4 m (Rehau, 2021).

La Figura 5D muestra el diagrama de los pozos instalados en forma inclinada. La construcción de este tipo de configuración se produce mediante la perforación de pozos en ángulo desde una única cámara de colector. Esto asegura que las puntas de los pozos se coloquen más separadas entre sí para maximizar y mejorar el intercambio de calor del sistema (Kurevija and Strpic, 2018).

En la Figura 5E se muestra la configuración convencional con pozos verticales típicos. Los orificios perforados generalmente se rellenan con lechada de bentonita mezclada con arena para mejorar la conductividad térmica del pozo. El diámetro y la longitud del pozo varían entre 100 y 200 mm y entre 20 y 200 m (Loveridge and Powrie, 2013). Se recomienda que el espacio entre los pozos vecinos debe ser de al menos 4.5 m para garantizar un rendimiento eficaz del sistema a largo plazo (Gultekin et al., 2016).

La instalación de la Figura 5F y 5G representan el caso típico en el que los intercambiadores de energía se instalan en elementos de cimentación de pilotes estructurales del edificio. Ofrecen ventajas similares a los intercambiadores de calor de pozo vertical. Están instalados a una profundidad donde la temperatura anual del suelo es relativamente constante. El costo de perforación inicial asociado con los pozos se elimina porque los pilotes ya eran necesarios para el soporte estructural (Loveridge, 2012).

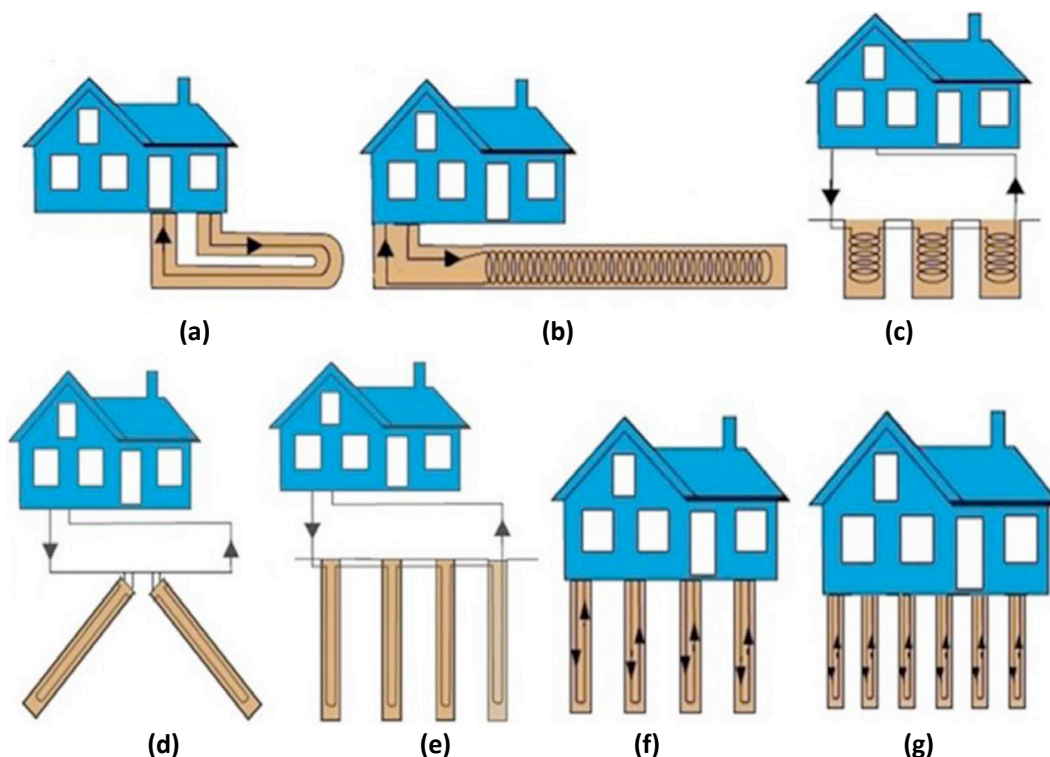


Figura 5. Configuración de intercambiadores de calor de circuito cerrado (Singh et al. 2019)

Sistemas de Bombas de Calor Aerotérmicas (SBCA)

Los SBCA obtienen el calor de la energía del aire, y existen dos tipos de bombas: aire-aire y aire-agua, las cuales pueden ser accionadas eléctricamente o por algún gas como el LP o el gas natural (AFEC, 2014). En la Figura 6 se ilustra el funcionamiento de un SBCA reversible desde el punto de vista del usuario. En modo refrigeración, la unidad interior

actúa como evaporador donde retira calor de la habitación y, la unidad exterior actúa como condensador donde se cede calor al ambiente exterior. Por el contrario, en modo calefacción la unidad interior corresponde al condensador donde se libera calor al espacio interior, y la unidad exterior corresponde al evaporador a partir del cual se absorbe calor del aire exterior.

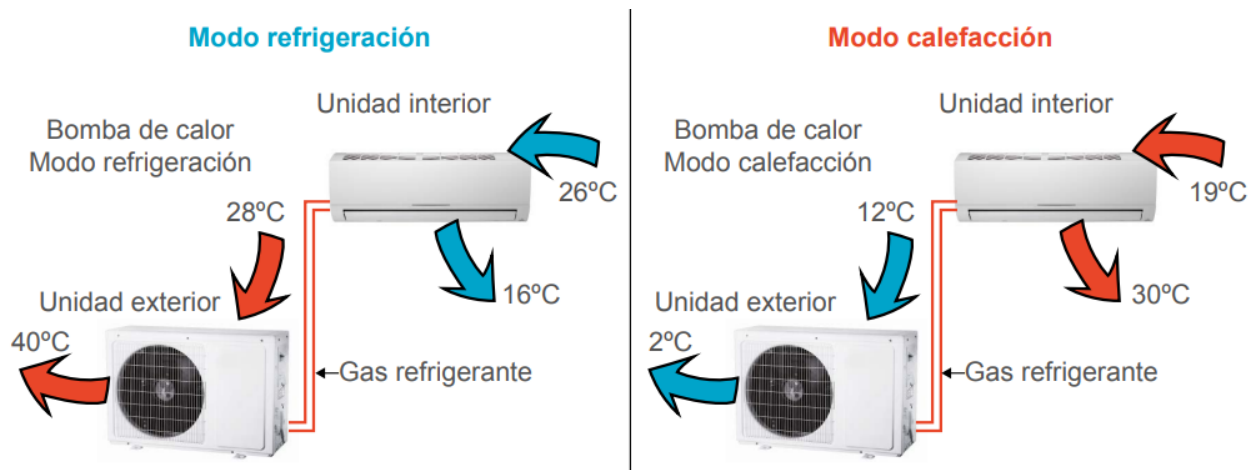


Figura 6. Operación de BC en modo calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha), (IDEA, 2014).

a) Bombas de calor aire-aire

Las bombas de calor aire-aire toman el calor del aire exterior para cederlo de forma directa al aire interior. Si el equipo es reversible, en modo refrigeración funciona en sentido inverso, proporcionando aire frío al recinto. Ambos intercambios, con el exterior y el interior, se realizan por medio del aire, que, impulsado por ventiladores, atraviesa los dos intercambiadores de calor de tubos aleteados denominados baterías, por los que circula el gas refrigerante que transporta el calor a lo largo del circuito (AFEC, S/A). Su aplicación se limita a la climatización de espacios.

b) Bombas de calor aire-agua

Estas máquinas toman el calor del aire exterior y lo transfieren a un circuito de agua. Con este circuito de agua se puede llevar la energía (agua caliente/agua fría) al sistema de climatización de espacios, o al sistema de agua caliente sanitaria, o de un cuerpo de agua, como una alberca. En modo refrigeración, en el intercambiador exterior se cede el calor del agua al aire, en tanto que en el intercambiador interior se absorbe el calor del ambiente calentando el agua. Es decir, estos equipos montan un intercambiador aleteado o batería, refrigerante-aire. Y un intercambiador refrigerante-agua.

Prestaciones de los SBCA

Desde el punto de vista termodinámico, una bomba de calor que trabaja con aire como fluido de intercambio con el medio exterior, varía su capacidad en función de la temperatura exterior (AFEC, 2014). Así mismo, la humedad relativa juega un papel importante en el funcionamiento y la eficiencia de la máquina, por lo que es importante conocer las condiciones de temperatura y de humedad del lugar en el que se va a instalar el equipo, así como los rangos de operación de la máquina, de tal forma que se diseñe un sistema que vaya a satisfacer las necesidades del proyecto.

El coeficiente de eficiencia (COP/EER) de este sistema tiende a ser un poco más bajo que la de una geotérmica; pero suele rondar en valores de entre 2 y 3 puntos; y los rendimientos estacionales (SCOP y SERR) suelen ser un poco más altos que los puntuales, aunque esto depende un poco más de la tecnología en específico que se utilice, y a las condiciones climáticas del lugar. Una de sus limitantes, por los rangos de operación, es en el intercambio directo con el aire, su rendimiento y capacidad dependen directamente de las condiciones atmosféricas; principalmente de la temperatura y la humedad; por lo que las condiciones de operación se vuelven limitadas, y difícilmente se pueden operar estas máquinas en condiciones de temperaturas exteriores inferiores a 0 grados o superiores a 45 grados (GIZ).

Resultados y Discusión

Estado actual del desarrollo de bombas de calor en México

La bomba de calor no es nueva: fue inventada por Lord Kelvin en 1852. El desarrollo de las bombas de calor se remonta a 1912 cuando se registró la primera patente con un circuito a tierra en Suiza. Sin embargo, es en los últimos 20 años cuando se ha registrado un aumento en el uso de esta tecnología para climatizar con calor o frío las edificaciones. Las primeras instalaciones con bombas de calor fueron geotérmicas, y fueron diseñadas para el sector residencial usando sistemas de agua subterránea.

La tecnología de las bombas de calor es poco conocida y difundida en México, en gran parte por los altos costos que conlleva, la falta de empresas especializadas en su desarrollo y el hecho de que existen pocas opciones en cuanto a proveedores y fabricantes. Las bombas de calor aerotérmicas para el calentamiento de albercas tiene más uso en el mercado mexicano, aunque, estos sistemas suelen ser máquinas de origen americano, aunque cada vez existen más opciones, lo que ha logrado que los precios se vuelvan más competitivos, y que se opte por esta tecnología en contra de calderas de gas y calentadores solares térmicos (Geoter, 2021).

Actualmente en México existen proyectos con bombas de calor, tal es el caso de los proyectos demostrativos desarrollados por el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), con una capacidad instalada de 77kW con instalaciones de bombas de calor geotérmicas para climatización de espacios. Estos proyectos fueron financiados por el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo) un proyecto nacional de I+D+i (investigación, desarrollo e innovación) financiado por el gobierno federal durante más de cuatro años (2014-2019), (Gutiérrez et., al 2020).

En el caso de empresas privadas como Geoter Renovables de México tiene más de 1MW térmico instalado con bombas de calor aerotérmicas y geotérmicas, para aplicaciones diversas como la climatización de espacios, el calentamiento de agua y el calentamiento de albercas. Todos estos proyectos con sus variables han empezado a dar a conocer la tecnología y los grandes beneficios económicos y ambientales que representa para el cliente.

A continuación, se describen brevemente los proyectos desarrollados en México:

a) Kinder y Clínica de Los Humeros, Chignautla, Puebla

Este proyecto se ejecutó entre los años 2015-2018 para climatizar un kínder de alrededor de 72 m² y a una clínica de unos 150m² de área. Los Humeros, se encuentra entre el estado de Veracruz y Puebla, rumbo a la ciudad de Perote, donde el clima es extremo frío, la gran parte de la estación del año, es por esto, que los parámetros de diseño del SBCG fue para calentamiento. En este lugar se instalaron dos bombas de calor de la marca GeoComfort (Estados Unidos), tipo vertical para climatizar el kínder que alberga alrededor de 15 niños y el docente con una capacidad de 7 kW. La configuración de todo el sistema fue SBCG agua-aire, es decir, se instaló una red de tuberías tipo slinky con tres trincheras y el sistema de distribución dentro del salón de clases fue de aire forzado (Rivas et al. 2021), ver Figura 7. El rendimiento de este equipo es de un COP de 4.2 (Rivas et al., 2021)

Para el caso de la clínica del IMSS, se instaló una bomba de calor de 14kW tipo combo vertical. Se implementó un intercambiador de calor tipo slinky con cinco trincheras. La bomba de calor al ser un combo, por un lado, provee calentamiento mediante un sistema de ductos y otra parte del edificio, se distribuye el calor mediante la instalación de piso radiante, ver Figura 8.

El beneficio que se obtiene en este proyecto demostrativo es de tipo social, debido a que mejora la calidad de vida de los estudiantes del kínder, niños de entre 3 a 7 años de edad, así como, de los pacientes que van a consulta a la clínica del IMSS, pueden realizar sus actividades sin sufrir del clima frío por las bajas temperaturas del exterior.



Figura 7. SBCG para Kinder, bomba vertical, GeoComfort



Figura 8. SBCG para Clínica IMSS, combo bomba Vertical, GeoComfort

b) Laboratorios de la UPBC, Mexicali, Baja California

En esta segunda instalación demostrativa, el proyecto se ejecutó entre los años del 2016 a 2019. Este proyecto se encuentra ubicado en la parte norte del país, en Mexicali, Baja California, donde se presentan dos climas, por un lado, extremo caliente y un par de meses, de noviembre a febrero, clima frío. Por lo tanto, este sistema trabaja para refrigeración, ya que, en época de invierno, es aceptable el clima frío. Se climatizaron dos laboratorios ubicados en la Universidad Politécnica de Baja California con un total de 42 kW de energía requerida. Para un laboratorio se ocupó una bomba de 4T con una configuración de intercambiador de calor en pozos verticales y para el otro laboratorio se diseñó con dos bombas para un total de 8T mediante la configuración del intercambiador de calor tipo slinkies. Ver Figura 9.



Figura 9. SBCG para laboratorios de UPBC, Bombas Horizontales, GeoComfort

c) Sala de Juntas, INEEL, Cuernavaca, Morelos (Rivas et al. 2021).

En esta tercera instalación ubicada dentro de las instalaciones de INEEL, en Cuernavaca, Morelos, se diseñó para usar pozos verticales de alrededor de 90 m de profundidad, esto para climatizar una sala de juntas de alrededor de 40 m² para una capacidad de 14 kW. La bomba de calor es de tipo horizontal de la marca GeoComfort. El proyecto se ejecutó entre los años del 2017 a 2019 y actualmente opera tanto para refrigeración como para calefacción. Ver Figura 10.



Figura 10. SBCG para sala de juntas del INEEL, Bombas Horizontales, GeoComfort

d) *Club Campestre de Aguascalientes, Aguascalientes.*

Este proyecto se ejecutó en 2018-2019 con el objetivo de calentar dos albercas que suman un aproximado de 2,900 m³. Una de ellas es olímpica (50*25m) al aire libre, la cual se mantiene entre los 27 y 28 °C de temperatura, y la otra es semiolímpica (25*12.5), con la diferencia de que esta última se encuentra techada y su temperatura suele ser un poco más alta, entre los 29 y 30 °C.

Para el calentamiento de estas albercas, se utilizaba un sistema de calderas de gas, apoyado por un sistema de paneles termosolares, que representaba un gasto para el cliente de aproximadamente 2.5 millones de pesos al año en gas LP. La propuesta aceptada por el cliente para reducir el consumo de gas en la mayor de las posibilidades, fue la de un sistema con bomba de calor geotérmico, con captación directa de un cuerpo de agua, en el que se extrae el calor de un lago artificial adyacente a la sala de máquinas donde se instalaron las bombas de calor. Este lago tiene aproximadamente 9,000 m³ a una temperatura que varía entre los 17 y los 22 °C durante la mayor parte del año. Al hacer pasar el agua del lago por los intercambiadores, se le quitan entre 3 y 6 °C al agua, y esta temperatura es la encargada de evaporar el gas refrigerante en el circuito de refrigeración de las máquinas. Se utilizan dos máquinas marca Rhoss (Italia) de 414kW de potencia térmica, para un total de 828kW de potencia, ver Figura 11.

La inversión del proyecto fue de casi 6 millones de pesos al año, con la que el cliente redujo su consumo de gas en más de 95%, y el costo energético de migrar del gas LP a la electricidad se redujo en un 50%, por lo que el retorno de la inversión está en 4.8 años. Este proyecto es de suma relevancia, ya que es uno de los primeros proyectos geotérmicos de baja temperatura que se conocen en el país, y con el que se demuestran todas las ventajas que tiene la tecnología.



Figura 11. SBCG Club Campestre, bombas Rhoss.

e) *Hotel Modelo, Aguascalientes, Aguascalientes.*

A finales de 2016 se inició la construcción de este hotel de 30 habitaciones en el centro histórico de Aguascalientes, en el cual se instalaron entre ese año y 2018, 4 máquinas aerotérmicas marca Ecoforest (España), que suman una potencia de 88kW térmicos, y con las que se climatizan las 30 habitaciones durante todo el año por medio de un sistema de hidrónico que utilizar fancoils para distribuir el calor (35 °C) en invierno y el frío (8 °C) durante el verano. Estas mismas máquinas se encargan de calentar el agua caliente del edificio, la cual se almacena en 4 depósitos que suman un total de 2,800 litros, que se mantienen a una temperatura de entre 45 y 50 grados, ver Figura 12.

Con este proyecto, se ponen a prueba por primera vez en México los sistemas del fabricante español Ecoforest (ver Figura 12), los cuales cuentan con tecnología de punta y con los que se han observado prestaciones sin igual, logrando coeficientes estacionales de hasta 7 puntos (COP=7). Otra particularidad del proyecto, es que el edificio no tiene instalación de gas, y todo el calor para el agua sanitaria se aporta por las máquinas. La inversión total fue de 2.5 millones de pesos y su retorno de 3 años. Actualmente se trabaja en una propuesta con ese cliente para alimentar la electricidad con un sistema solar fotovoltaico, y de esta manera reducir al mínimo los costos operativos.



Figura 12. SBCG Hotel Modelo, Bombas Ecoforest

f) Sistema de híbrido de bombas de calor/energía solar fotovoltaica en casa habitación, León, Guanajuato.

Una de las tendencias actuales, y de los proyectos que más rentabilidad tienen, es el de hacer sistemas híbridos, con los cuales se aproveche la energía térmica con una bomba de calor, y que esta esté alimentada por un sistema solar fotovoltaico, de tal manera que el usuario reduzca los costos al mínimo.

Es el caso de una casa habitación en la que se cambió el sistema de calentamiento de la alberca y el sistema de calentamiento de agua sanitaria. Se instalaron 5.92 kW de potencia fotovoltaica. Para el calentamiento de la alberca a 32 grados, se instaló una bomba de calor aerotérmica marca Ecokal (México) de 26kW de potencia con un COP de 5 puntos (ver Figura 13), y para el calentamiento de agua caliente sanitaria se instaló una bomba de 10kW de potencia marca Stiebel Eltron (Alemania).

El cliente tenía un gasto mensual en energía eléctrica y gas LP que sumaba 5,000 pesos (4,000 y 1,000 respectivamente), y con el sistema híbrido se redujo este costo a menos de 100 pesos al mes. La inversión fue de 300,000 pesos, por lo que el retorno de la inversión es de 5 años.



Figura 13. SBCA para sistema Híbrido, Bomba Ecokal

Conclusiones

En este trabajo se proporciona una revisión detallada de bombas de calor, centrada en los sistemas geotérmicos, aerotérmicos y el estado actual en el uso y desarrollo de esta tecnología en México. Las bombas de calor se usan en 54 países para confort en todo tipo de edificios, con una vida útil de 25 años por el propio equipo de bomba de calor y más de 50 años por el intercambiador de calor (en el caso de ser geotérmica). Existen ahorros de consumo en energía eléctrica entre el 30 al 75 %, reduciendo así, las emisiones de gases de invernadero. Se pueden usar para calefacción y refrigeración de espacios, así como para abastecimiento de agua caliente sanitaria (ACS) y pueden instalarse en la mayoría de las situaciones geológicas (excepto en áreas donde el agua subterránea está protegida legalmente).

Los proyectos presentados en este trabajo demuestran que la tecnología de bombas de calor es altamente rentable, y que es necesario que se introduzca más la tecnología en el mercado mexicano. Aunque actualmente en México los beneficios económicos de estos sistemas no se ven reflejados en el corto plazo en la mayoría de los casos, sus prestaciones y ahorros logran que sean económicamente viables al mediano plazo, y depende del desarrollo de la tecnología y de que se amplíe su introducción en el mercado nacional para que sus costos se reduzcan, y que los retornos de las inversiones se vuelvan más atractivos.

Se necesita una mayor difusión por parte de las empresas privadas, apoyadas por el gobierno y las instituciones, que a su vez, deberían de crear y fomentar diferentes herramientas como normativas, regulaciones e incentivos por parte de los gobiernos federal, estatales y municipales, para ayudar a que dicha tecnología tenga un mayor alcance.

En términos de costo, en definitiva, las bombas de calor geotérmicas y aerotérmicas tienen costos más altos que las tecnologías convencionales de uso común en México, como los sistemas de aire acondicionado a base de mini Split, los sistemas de calefacción a gas, los sistemas de calentamiento de albercas basados en el uso del gas, etc; pero debido a sus altas prestaciones y eficiencia, las inversiones suelen tener periodos de retorno bastante interesante y en la mayoría de los casos en tiempos de entre 2 y 3 años. Con el aumento de la oferta en el país, los costos se irán reduciendo, haciendo que a la tecnología sea más rentable.

Es una importante tecnología de energía renovable y que se irá convirtiendo en un nuevo punto de crecimiento en el desarrollo económico en México.

Bibliografía

- AFEC. (2014). Asociación de Fabricantes de equipos de climatización. España. ISBN:978-84-606-5447-6.
- Athresh, A. P., Al-Habaibeh, A., & Parker, K. (2016). The design and evaluation of an open loop ground source heat pump operating in an ochre-rich coal mine water environment. *International Journal of Coal Geology*, 164, 69-76.
- Banks, D. (2012). An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling. John Wiley & Sons.
- De Buen, O. (2005). Consumo de energía en los sectores residencial y comercial en México. Disponible en www.funtener.org/pdfs/Presentacion1-CCA-EV.pdf.
- Figueroa, A., I. Marincic, M. Ochoa, y J. Rojas (2010). Energía en edificaciones. En: Estrada, C., e Islas J. (Eds.), *Energías Alternas: Propuesta de investigación y desarrollo tecnológico para México*. Academia Mexicana de Ciencias, pp. 83-89.
- Fridleifsson, I. B., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J. W., Ragnarsson, A., & Rybach, L. (2008). The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. In *IPCC scoping meeting on renewable energy sources, proceedings, Luebeck, Germany* (Vol. 20, No. 25, pp. 59-80). Citeseer.
- García-Gutiérrez, A., Rivas-Cruz, F., & Torres-Luna, V. (2017). Bombas de Calor Geotérmicas para acondicionamiento de espacios habitacionales y comerciales: Proyecto 13 del CeMIE-Geo. XXII Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana.
- Gutiérrez, A. G., & Estrella, I. M. (2012). Estado actual de desarrollo de las Bombas de Calor Geotérmico. *Geotermia*, 58.
- Gutiérrez-Negrín, L. C., Canchola Félix, I., Romo-Jones, J. M., & Quijano-León, J. L. (2020). Geothermal energy in Mexico: update and perspectives. In *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Gultekin, A., Aydin, M., & Sisman, A. (2016). Thermal performance analysis of multiple borehole heat exchangers. *Energy Conversion and Management*, 122, 544-551.
- IDEA (2014). Síntesis del Estudio Parque de Bombas de Calor en España. www.idae.es. España
- Kurevija, T., & Strpić, K. (2018). Hydraulic and thermogeological design differences between two-loop vertical and inclined coaxial borehole heat exchangers. *Renewable energy*, 117, 314-323.
- Kovačević, M. S., Bačić, M., & Arapov, I. (2013). Possibilities of underground engineering for the use of shallow geothermal energy. *Gradevinar*, 64(12), 1019-1028.
- Loveridge, F. (2012). The thermal performance of foundation piles used as heat exchangers in ground energy systems (Doctoral dissertation, University of Southampton).

- Loveridge, F., & Powrie, W. (2013). Pile heat exchangers: thermal behaviour and interactions. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 166(2), 178-196.
- Lund, J. W., & Toth, A. N. (2020). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 101915.
- Lund, J., 2007. Geothermal (Ground-source) Heat Pumps. Lecture presented at IIE, Cuernavaca, México, 2007. Inédito.
- Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(9), 2265-2300.
- Preene, M., & Powrie, W. (2009). Ground energy systems: from analysis to geotechnical design. *Géotechnique*, 59(3), 261-271.
- REHAU (2021) unlimited polymer solutions. RAUGEO HELIX PROBE PE-Xa: The alternative to probes and horizontal collector n.d. <https://www.gshp.org.uk/documents/REsearchseminar2010/Ralf%20Winterling%20Spiral%20Probes.pdf>. Consultado Sep 2021
- Rivas-Cruz F., Torres-Luna V., Gaonzález-García D., & Rosales-López Cesar (2021). Performance Monitoring of a Ground Source Heat Pump System with a Horizontal GHE in Los Humeros, Puebla, México. WGC2021 + 1, Reykjavik, Islandia.
- Singh, R. M., Sani, A. K., & Amis, T. (2019). An overview of ground-source heat pump technology. *Managing Global Warming*, 455-485.
- Zhai, X. Q., Qu, M., Yu, X., Yang, Y., & Wang, R. Z. (2011). A review for the applications and integrated approaches of ground-coupled heat pump systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(6), 3133-3140.