

Estado actual de desarrollo de las Bombas de Calor Geotérmicas

Alfonso García Gutiérrez e Ignacio Martínez Estrella

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Av. Reforma 113, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, CP 62490 (aggarcia@iie.org.mx)

Resumen

Una bomba de calor es una máquina térmica que opera como un refrigerador: la diferencia básica radica en el uso deseado. El refrigerador se usa esencialmente para enfriar un espacio o fluido, mientras que la bomba de calor puede usarse para proporcionar enfriamiento y calefacción. Una bomba de calor geotérmica (BCG) tiene como fuente de calor el subsuelo, ya sea por acoplamiento en el suelo o en agua subterránea, transfiriendo el calor entre el subsuelo y el sistema de distribución de calefacción y enfriamiento. Su comportamiento está dado por el coeficiente de comportamiento o de rendimiento (*Coefficient of Performance*, COP, por sus siglas en inglés) y tiene valores típicos de 3-4, aunque se han reportado valores de hasta 10. Esto quiere decir que por cada kW de energía eléctrica usada se ceden 3-4 o más kW de energía térmica. De allí que las BCG tengan ahorros típicos del 50-75% ya que solo se paga por la energía utilizada en el compresor y la energía del subsuelo es esencialmente gratis. Las BCG se pueden instalar en la mayoría de situaciones geológicas (excepto en áreas donde el agua subterránea está protegida legalmente) en el mundo debido a la naturaleza ubicua del recurso geotérmico presente a profundidades someras y desde hace algunos años su crecimiento ha sido impresionante. Esto y la creciente concientización y popularidad de las BCG han tenido el impacto más significativo en el uso directo de la energía geotérmica, de manera que las BCG representan hoy en día el sector de tecnología geotérmica mundial con el mayor crecimiento en un número cada vez más creciente de países. La utilización anual de estas unidades creció 2.29 veces entre 2005 y 2010 a un ritmo anual de 18%, mientras que la capacidad instalada creció 2.15 veces a un ritmo anual de 16.6% en el mismo período. Asimismo, las BCG representan proporcionalmente el mayor uso y la mayor capacidad instalada de todos los usos directos de la energía geotérmica a nivel mundial, y se usan actualmente en 43 países aunque sus instalaciones se localizan principalmente en Norte América, Europa y China. Las BCG representan una tecnología probada mundialmente, son eficientes, ahorran energía y costos de operación, evitan la emisión de gases de invernadero y se pueden instalar prácticamente cualquier lugar. En este trabajo se describen las características principales de las BCG, sus ventajas y desventajas, sus aplicaciones en diversos sectores y su estado actual de desarrollo y aplicación.

Palabras Clave: Bombas de Calor, Energía Geotérmica, Aire Acondicionado, Calefacción.

Introducción

Globalmente, el consumo de energía indica que éste podría duplicarse hacia el año 2020 de acuerdo con las tendencias actuales. Esta creciente demanda de energía impactará la disponibilidad de energía y el impacto sobre el medio ambiente. A nivel mundial, los edificios consume aproximadamente el 40% de la energía total anual (Omer, 2008), y más de la mitad de esta energía es consumida por los sistemas de aire acondicionado (Zhai, et al., 2011). Consecuentemente, con relación a los edificios es de gran importancia mejorar la eficiencia energética de los sistemas de aire acondicionado.

En México, es creciente la importancia del consumo de energía para el confort de los ocupantes de los edificios de los sectores residencial y comercial (De Buen, 2005), ya que predomina el clima cálido y en algunas regiones en la zona norte y en las regiones montañosas del país, estacionalmente se presentan temperaturas bajas. Además, se han ido ampliando las necesidades, las dimensiones y el contexto de los espacios donde se realizan las actividades económicas, es decir, en el sector terciario que incluye almacenes, oficinas, escuelas, hospitales, hoteles, bancos y restaurantes. Lo anterior implica que, en la mayoría del territorio nacional, los espacios construidos tienen que integrar elementos que permitan el confort de sus ocupantes. De acuerdo con datos de SENER (2010), del total de energía consumida en 2009, el 20% (913.4 TJ) la consumieron los sectores residencial, comercial y público (761.8, 123.6 y 28.1 TJ, respectivamente). A su vez el consumo de electricidad en estos sectores 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 al acondicionamiento de espacios. Por ello, el sector de edificaciones se ha planteado: (a) disminuir la demanda de energía convencional, (b) reducir los impactos ambientales y (c) mantener condiciones interiores confortables con respecto a cambios en la temperatura exterior (Figueroa et al., 2010). Sin embargo, de continuarse utilizando los equipos convencionales para acondicionamiento de espacios implicará un mayor consumo de energía ya que en el sector residencial de México se utilizan tecnologías que muchas veces se basan en equipos de bajo rendimiento energético, utilizan electricidad generada primordialmente con base en combustibles fósiles, y que además impactan negativamente la economía de los usuarios.

En este contexto, las BCG constituyen una alternativa interesante ya que se trata de una tecnología comercial existente que tiene un costo competitivo y que permite ahorros de energía y evita las emisiones de gases de invernadero, especialmente cuando se usan tanto para enfriamiento como para calefacción, y pueden ser instaladas en prácticamente cualquier parte. En el presente trabajo se describen las características principales de las BCG, sus ventajas y desventajas, sus aplicaciones en diversos sectores y su estado actual de desarrollo y aplicación.

Aspectos teóricos

La Fig. 1 muestra un esquema de una bomba de calor con sus tres partes principales: (1) el espacio acondicionado, (2) la bomba de calor BC misma y (3) la fuente/sumidero de calor.

- El espacio a acondicionar puede ser una edificación donde se tiene el sistema de distribución de aire, alimentado a las condiciones de temperatura y humedad requeridas.
- La BC es una máquina térmica 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. La BC puede operarse para proporcionar enfriamiento o aire acondicionado y calefacción de espacios habitados y para calentamiento de agua doméstica.
- La fuente o sumidero de calor puede ser aire, agua o el subsuelo. En este último caso, a la BC se le denomina Bomba de Calor Geotérmica BCG o GHP por sus siglas en inglés.

La operación reversible de la BCG es posible gracias al uso de una válvula reversible, ver Fig. 2, y su conexión al subsuelo se hace en *circuito cerrado*, vertical u horizontal (GCHP), o en *circuito abierto* a un pozo de agua subterránea (GWHP) o aun cuerpo de agua superficial estática o corriente, p. ej., un lago o un río (SWHP), ver Figura 3. El fluido que conecta el subsuelo con la BCG es agua con o sin anticongelante.

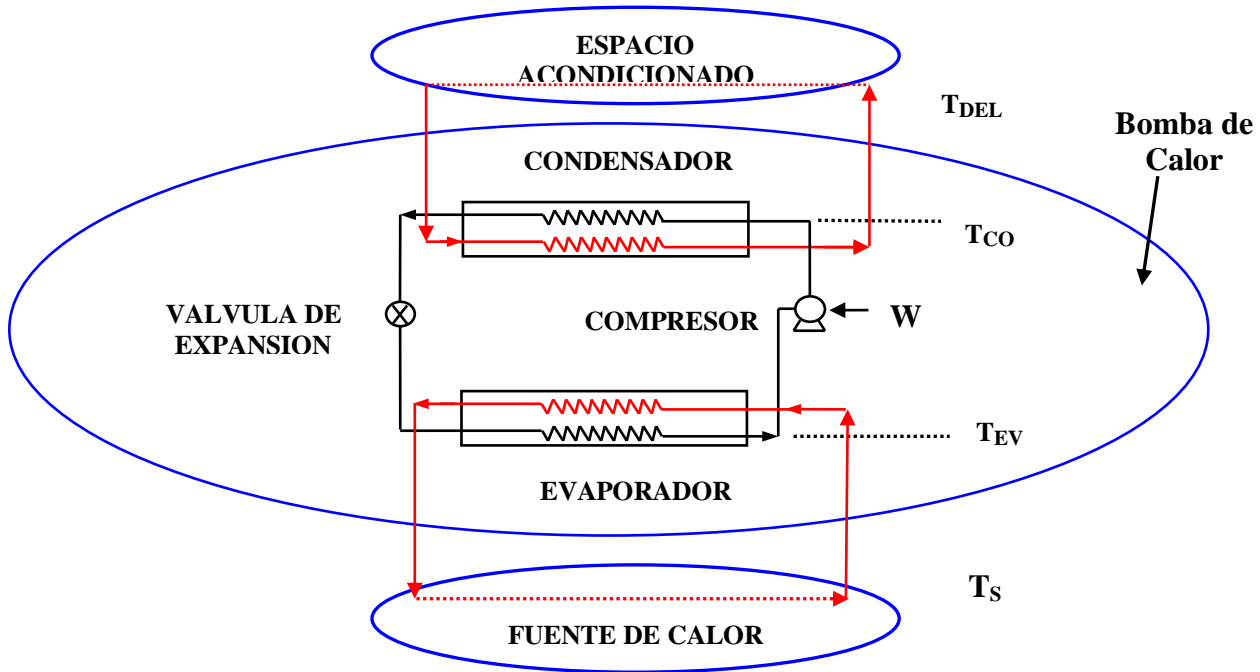


Figura 1. Diagrama esquemático de una bomba de calor

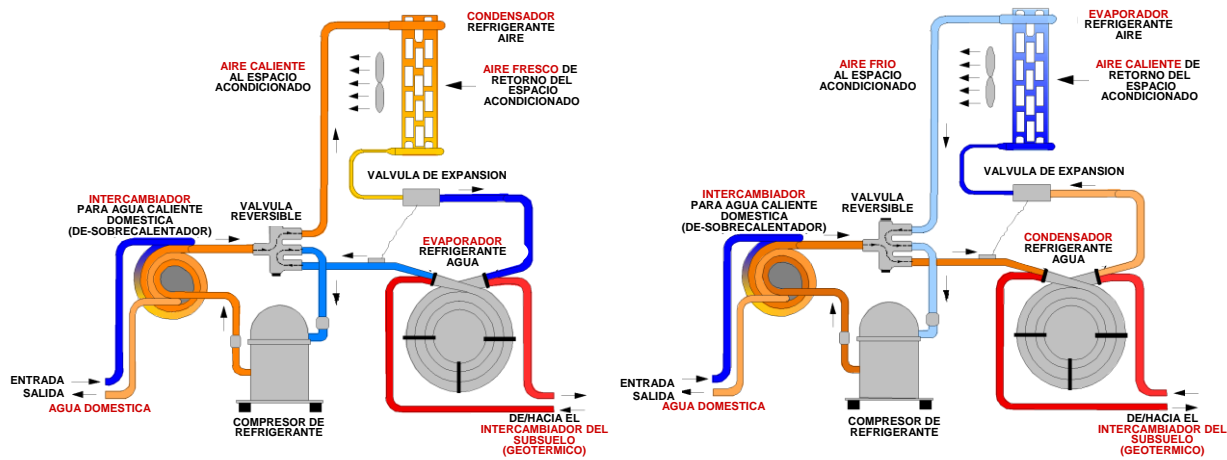


Figura 2. Operación de una BCG en modos calefacción (izquierda) y enfriamiento (derecha) (adaptada de Lund, 2007)

El comportamiento o eficiencia de una bomba de calor por compresión mecánica operando a condiciones dadas de la fuente y del sumidero está dado por el Coeficiente de Comportamiento o de rendimiento (Coefficient of Performance, COP, por sus siglas en inglés) y se define como el cociente entre la energía térmica cedida por la bomba de calor y el trabajo realizado por el compresor. En el modo de calefacción,

$$COP = \frac{Q_{CO}}{W} = \frac{Q_{CO}}{Q_{CO} - Q_{EV}}$$

En el modo de enfriamiento,

$$COP = \frac{Q_{EV}}{W} = \frac{Q_{EV} + W}{W}$$

donde Q_{CO} es el calor entregado por el condensador de la bomba de calor al espacio acondicionado, Q_{EV} es el calor transferido de la fuente de calor al fluido de trabajo en el evaporador de la bomba de calor y W es la energía eléctrica suministrada al compresor.

Los valores típicos del COP 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 de 3.5 unidades de energía térmica, de las cuales 2.5 (71%) son de energía geotérmica la cual es esencialmente gratis.

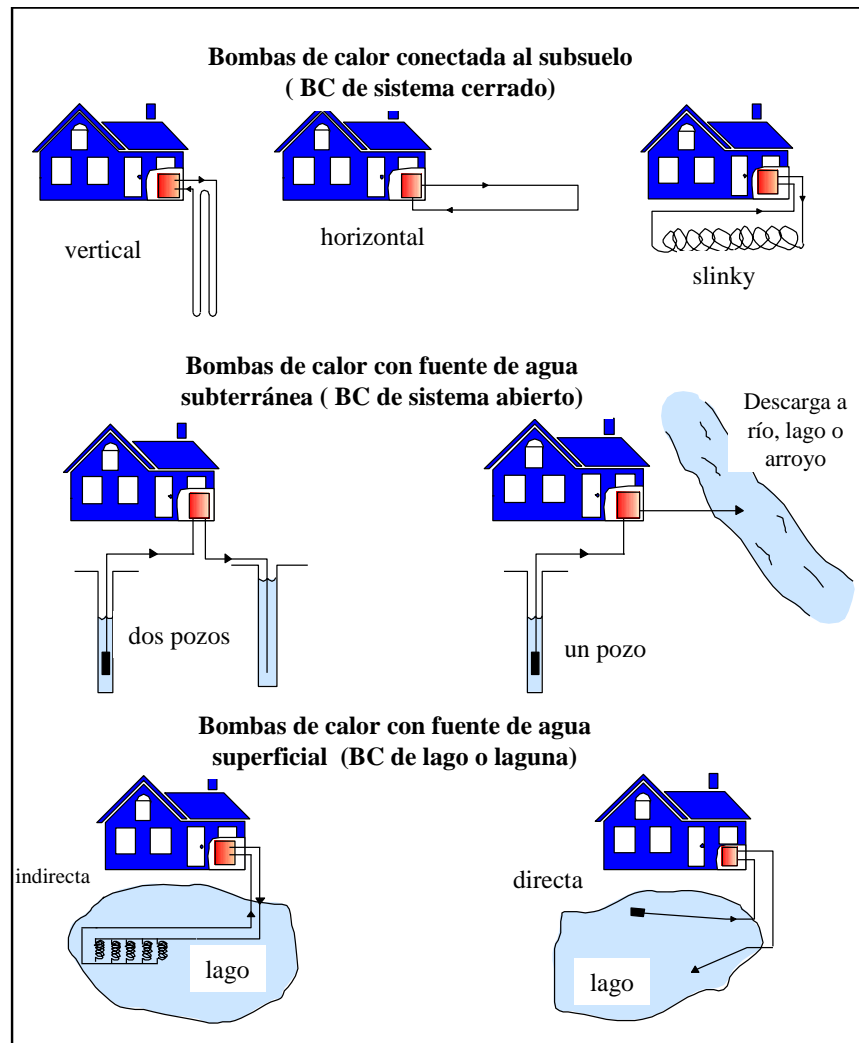


Figura 3. Diagrama esquemático de una BCG (modificada de Lund, 2007)

Fluidos de trabajo

Los fluidos de trabajo tradicionales son los clorofluorocarbonos (CFCs): Freón 12, 22, 114, R-500 y R502, sin embargo debido al daño que causan a la capa de ozono, estos fluidos han sido prohibidos en la mayoría de los países. Los hidro-clorofluorocarbonos (HCFCs) son fluidos más recientes y contienen cloro pero su potencial de agotamiento del ozono (ODP por sus siglas en inglés) es menor que el de los

CFCs, del 2-5 % de CFC-12. Su potencial global de calentamiento (GWP por sus siglas en inglés) es el 20% del valor de CFC-12. Estos fluidos se denominan fluidos de transición, tales como R-22, R-401, R-402, R-403, R-408, y R-409. Los hidrofluorocarbonos HFCs se consideran como fluidos alternativos de largo plazo y no tienen cloro, tales como R-143A, R-152A, R-32, R-125 Y R-507. Debido a que no contribuyen al agotamiento del ozono, representan una alternativa de largo plazo. Las mezclas representan una posibilidad importante para reemplazar a los CFCs, y los fluidos más prometedores para reemplazar al R-22 son las mezclas de R-407C y R-410A. El primero de estos fluidos es apropiado para ciertos sistemas únicamente, mientras que el segundo es muy popular en EUA y Japón para bombas de calor tipo paquete y unidades de aire acondicionado (HPC, 2010).

Estado actual de desarrollo de las BCG

Las BCG se usan para calefacción y enfriamiento de espacios y para abastecimiento de agua caliente doméstica y pueden instalarse en la mayoría de situaciones geológicas (excepto en áreas donde el agua subterráneas está protegida legalmente) en el mundo debido a la naturaleza ubicua del recurso geotérmico presente a profundidades someras.

La bomba de calor no es nueva: fue inventada por Lord Kelvin en 1852. El desarrollo de las BCG se remonta a 1912 cuando se registró la primera patente con un circuito a tierra en Suiza. Sin embargo las en los últimos 10 a 20 años es cuando se ha registrado un dramático aumento en el uso de BCG para enfriar y calentar edificaciones. Las primeras BCG fueron diseñadas para el sector residencial usando sistemas de agua subterránea. A mediados de los 80 las mejoras en las eficiencias y los rangos de operación, combinados con mejores materiales para los circuitos a tierra permitieron las conexiones acopladas al subsuelo. Al mismo tiempo, las aplicaciones comerciales e institucionales fueron más comunes. Hoy en día, la tecnología puede considerarse madura y enfrenta principalmente barreras no técnicas para su mayor desarrollo.

Los usos directos a nivel mundial de la energía geotérmica en 2010 ascendieron a 423,830 TJ/año (117,740 GWh/año) de energía y 48,893 MWt de capacidad instalada, y de todos estos usos, las BCG poseen la mayor utilización (47.2%) y capacidad instalada (68.3%), respectivamente. Así, la creciente concientización y popularidad de las BCG ha tenido el mayor impacto en el uso directo de la energía geotérmica de manera que las BCG son hoy en día el sector de la tecnología geotérmica con el mayor crecimiento. Entre 2005 y 2010, su utilización de energía geotérmica creció 2.29 veces a un ritmo anual de 18%, y su capacidad instalada creció 2.15 veces a un ritmo anual 16.6% (Lund et al., 2011). En 2010, la capacidad instalada mundial mediante BCG fue de 33,134 MWt y el uso anual de energía ascendió a 200,149 TJ/año, con un factor de capacidad de 0.19 en modo calefacción. Las BCG se utilizan en 43 países, principalmente en Norteamérica, Europa y China, a diferencia de los 26 países que utilizaban esta tecnología en 2000 o 33 países en 2005. La Figura 4 y la Tabla 1 muestran la evolución de esta tecnología.

En EUA la mayoría de las unidades están diseñadas para carga pico de enfriamiento y están sobre diseñadas para calefacción, excepto en los estados del norte, con un promedio de 2000 horas/año de carga total (factor de carga de 0.23). En Europa, la mayoría de las unidades están diseñadas para carga pico de calefacción y a menudo están diseñadas para proveer la carga base, mientras que la demanda pico es provista mediante combustibles fósiles. Las unidades pueden operar hasta 6000 horas/año a carga plena (factor de carga de 0.68), como ocurre en los países nórdicos. Los líderes en unidades instaladas son EUA, China, Suecia, Alemania y Holanda. El número equivalente de unidades instaladas de 12 kWt (típico de las casas de EUA y Europa del Oeste) es de unos 2.76 millones, aunque el tamaño

de las unidades individuales varía desde 5.5 kW para uso residencial hasta más de 150 kW para uso comercial o institucional.

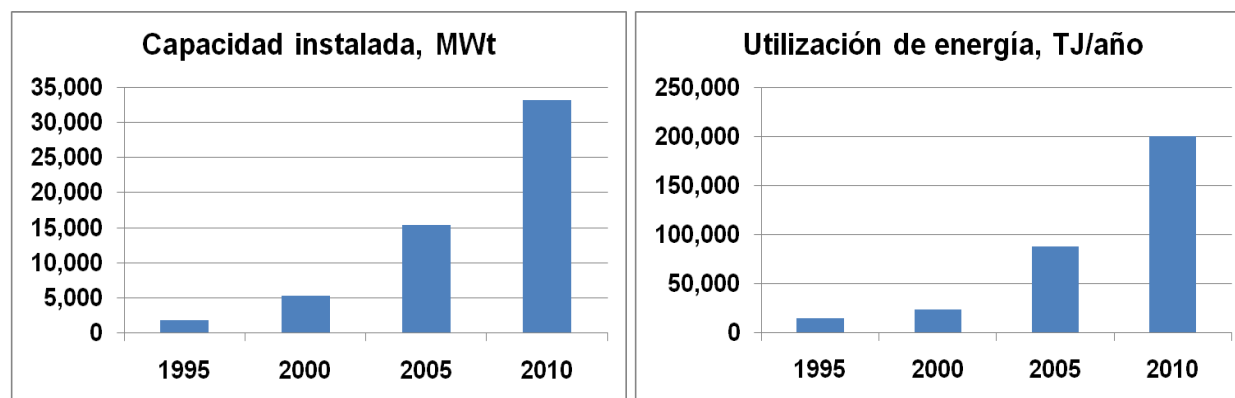


Figura 4. Evolución de las BCG a nivel mundial (elaborada con datos de Lund, 2011)

Tabla 1. Evolución del uso de las BCG a nivel mundial (elaborada con datos de Lund, 2011)

	1995	2000	2005	2010
Capacidad, MWt	1,854	5,275	15,384	33,134
Utilización de energía, TJ/año	14,617	23,275	87,503	200,149
Factor de capacidad, %	0.25	0.14	0.18	0.19
Unidades equivalentes de 12 kW	154,500	439,583	1,282,000	2,761,167
No. de países donde se utilizaron	n/d	26	33	43

Actualmente existen más de 550,000 BCG acopladas al subsuelo (GCHP), 80% son unidades domésticas y se instalan más de 66,000 unidades nuevas cada año (Zhai, et al., 2011), aunque en China las ventas de acondicionadores de aire para habitaciones (*room air conditioners*) ascendieron a 27 millones de unidades en 2009 y se estima que globalmente existen 800 millones de BC instaladas, incluyendo unidades para habitación, enfriadores y bombas de calor para calefacción de espacios y de agua (IEA, 2011). En EUA se instalaron 121,423 BCG en 2008 (Mañón, 2010) y existen al menos 1 millón de unidades instaladas (Lund et al., 2011), con 70% en edificios residenciales y 30% en edificios comerciales e institucionales, 90% son de circuito cerrado conectado a tierra (45% vertical, 45% horizontal) y 10% son de circuito abierto (agua subterránea), y se estima que para el 2016 se instalen 1 millón de unidades por año (Williams, 2010). Globalmente, se contemplan 3.5 billones de unidades instaladas en 2050 en el sector residencial para calefacción, A/C y agua caliente doméstica (IEA, 2011).

Costos

Hoy en día la tecnología de las BCG es madura, y para continuar su desarrollo enfrenta retos esencialmente no técnicos, principalmente asociados a su alto costo inicial:

- Casi el doble de un sistema central convencional para uso residencial
- 20% a 40% mas que las unidades de volumen constante de una zona instalada en un techo
- hasta 20% mas que un arreglo de agua fría multizonas o central de dos tubos

Sin embargo, sus costos del ciclo de vida son menores que los sistemas convencionales por su alta eficiencia y menores costos de mantenimiento.

Los costos de una GCHP instalada son de \$500 a \$850 USD/kW para calefacción y enfriamiento en casas unifamiliares (IEA, 2011) con tamaños entre 2 a 19 kW, eficiencias de 280 a 500% y una vida útil de 15-20 años. Estos costos pueden aumentar hasta unos \$1,700 USD/kW para una unidad de circuito cerrado horizontal (Geyer, 2011). Sin embargo, el costo depende de la zona climática y la superficie de la edificación. El costo promedio para una vivienda de 200 m² es de 12,500 € para una temperatura ambiente de -5°C y de 10,000 € para 0°C (Mañón, 2010).

El costo inicial del capital representa el mayor gasto de las BCG. El período de retorno del capital es menor a 10 años o menos debido a los ahorros de energía de 30 a 75%; además, se espera que disminuya a medida que aumente el uso masivo de las BCG y por el creciente costo de la energía (Johnston. Et al., 2011). De hecho, en las nuevas instalaciones, estos costos se consideran como parte de la inversión y el gasto como aceptable ya que en un solo equipo se tienen los servicios de aire acondicionado, calefacción y agua caliente doméstica. Boyd y Lienau (1995) estimaron que el período de retorno del capital para BCG era de 2.8 años para unidades en el sector comercial, 6.8 años en el sector residencial y 7.0 años en el sector educativo. Sin embargo, para amortiguar la inversión inicial e incentivar el uso de las BCG, en EUA y Europa, los gobiernos proporcionan apoyos para instalar unidades de \$500 a \$2,000 USD/casa.

Aplicaciones diversas

Las BCG geotérmicas se usan para acondicionar espacios (calefacción, enfriamiento, aire acondicionado) y agua caliente para uso doméstico y para calentar albercas. Los edificios con BCG incluyen casas, oficinas, hoteles, aeropuertos, estaciones de metro, talleres, escuelas, hospitales, centros de recreación, ranchos, etc. Lund (1990) describe el uso de las BCG en diferentes estados de EUA. Boyd y Lienau (1995) compilaron datos de 256 casos de estudio en EUA: 184 residencias, 26 escuelas y 46 comercios. El Geo-Heat Center (GEO, 2005) compiló varios casos de estudio en 2005 que incluyen el Calpine Visitor Center en California, varias escuelas, posadas, ranchos y centros comunitarios, donde se menciona el uso de las BCG. También se comentan los planes para instalar una BCG en el Palacio de Buckingham en Londres y que personajes como Elton John y Paul Allen de Microsoft han instalado BCG en sus propiedades. Kjellsson et al. (2010) mencionan que las BCG son de uso común en casas en Suecia. Hamada et al. (2007) describen el uso de cimentaciones y pilotes de fricción como intercambiadores de calor en edificaciones residenciales y para oficinas. Michopoulos et al. (2007) presentaron un intercambiador de calor vertical de tierra en conexión paralela acoplado a un sistema de BCG para A/C en Grecia. Hwang et al. (2009) describen el comportamiento de una BCG para enfriamiento en una escuela en Corea. Sanner et al. (2003) revisaron el desarrollo temprano de las BCG para edificios comerciales. Cui et al. (2003) mencionan que una BCG puede satisfacer las demandas de energía de una alberca techada. La aplicación de las BCG en edificios civiles también se incluyen en los trabajos de Hochstein et al. (2008), Gao et al. (2009), O'Sullivan et al. (2009), Serpen et al. (2008) y Thain et al. (2009). Cross et al. (2011) documentan más de 160 universidades y colegios de 36 estados de EUA que usan energía geotérmica.

Algunos otros de los muchos estudios existentes incluyen: el avance de las BCG en Europa hasta 2003 (Sanner, et al., 2003); una BC que usa agua de lluvia y el subsuelo como fuente de calor (Gan et al. 2007); una BC aire-agua operando con CO₂ como refrigerante para proporcionar agua caliente (Yokohama et al., 2009); una revisión de métodos para evaluar las resistencias térmicas de pozos

perforados (Lamarche et al., 2010); una revisión sobre diferentes análisis exergéticos de sistemas de refrigeración por compresión (Ahamed et al., 2011), un análisis para regularización y estandarización de las BCG en Italia (Rizzi et al., 2011); un estudio de BCG híbridas para acondicionamiento de espacios en climas cálidos (Mana et al., 2010) y una revisión de aplicaciones y sistemas integrados de las BCG (Zhai et al., 2011). En este último trabajo se describen sistemas de BCG acoplados con sistemas de energía solar, torres de enfriamiento, almacenamiento de energía, sistemas convencionales de A/C, deshumidificadores, recuperación de calor, etc. Los trabajos sobre BC operando con energía geotérmica en México se resumen en García-Gutiérrez et al. (2010).

A continuación se describen brevemente algunas instalaciones importantes;

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 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 \$25,000/mes (datos de 2007).

b) Estación Metro de Pacífico de Madrid

En esta estación se tiene un sistema de BCG para climatizar 1,090 m² (A/C y calefacción) de los andenes de la línea 1, 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% las emisiones de CO₂.

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

Este centro tiene 57,800 m² de espacio donde laboran 1,200 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 (en 2007).

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

Un centro de recreación es el centro de las actividades comunitarias en Canadá y la pista de hockey es el corazón del centro. Esta aplicación en particular tiene BC para: (a) refrigerar la pista de patinaje; (b) proporcionar deshumidificación, A/C y calefacción del área “helada” del espectáculo (el estadio o gimnasio), (c) calentar parte del edificio y los asientos de las gradas son calentados 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 acondicionamiento de clima (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 5,000 toneladas para enfriamiento, A/C y calefacción. La instalación consta de más de 40 edificios, dos áreas con 4,000 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 y reducirá las emisiones de gases de invernadero en un 50%, equivalentes a 80,000 toneladas of carbón/año

Ventajas/Desventajas

Las BCG poseen ventajas en comparación con la BC aire-aire (su más cercano competidor):

- Consumen menos energía para operar
- Explotan una fuente de energía a temperatura constante; la BC aire-aire dependen de la temperatura del aire externo, la cual es baja cuando la demanda de calefacción es alta y alta cuando la demanda de enfriamiento es alta. Por ende, requieren mayor electricidad y son menos eficientes en temporadas de temperatura externa extrema
- No requieren energía complementaria
- Usan menos refrigerante
- Diseño y mantenimiento más sencillo
- No requiere que la unidad esté expuesta al medio
- Mayor vida del equipo

En general, las BCG tienen **beneficios económicos** porque permiten ahorrar dinero a lo largo de su vida útil; **beneficios tecnológicos** porque representan una tecnología probada que se usa en 43 países para confort en todo tipo de edificios y su vida útil es de 25 años para la BC propiamente dicha y 50 años para el circuito de conexión a tierra; **beneficios energéticos** porque permiten ahorros de 33 a 75% de energía y reducen la demanda de electricidad sobre las plantas de generación, contribuyendo a la seguridad energética nacional; **beneficios ambientales** porque reducen la emisión de gases de invernadero entre 33 y 75% al usar menos electricidad y evitar el uso de combustibles fósiles: De hecho, la BCG es la mejor tecnología disponible para calefacción y aire acondicionado: su potencial de ambiental se ha estimado en 1.2 billones de toneladas de CO₂ por año o 6% de la emisión global de CO₂ (Fridleifsson et al., 2008), y **beneficios sociales** porque mejoran la calidad de vida de todos los involucrados con la construcción, el uso, y el mantenimiento de la instalación y por la creación de los empleos.

Conclusiones

Las BCG representan una tecnología madura y es el sector de tecnología geotérmica de mayor crecimiento a nivel internacional. Sin embargo, las BCG enfrentan retos esencialmente no técnicos, principalmente asociados a su alto costo inicial, el desconocimiento de la tecnología de parte de usuarios potenciales y gobiernos de ciertos países como el nuestro, así como mejoras tendientes a la optimización del diseño para mejorar su rendimiento. Esta tecnología no se utiliza actualmente en México, y su potencial utilización masiva radica en las zonas con climas extremos para acondicionamiento de espacios en los sectores residencial comercial y de servicios ya que sus beneficios son significativos tanto económicos como tecnológicos, ambientales y sociales. En países como en EUA y en Europa, los incentivos por parte de los gobiernos han contribuido al uso masivo de esta tecnología.

Referencias

- Ahamed, J.U., Saidur, R., Masjuki., H.H., 2011. A review of methods of exergy analysis of vapor compression refrigeration systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1593-1600.
- Boyd, T.L., Lienau, P.J., 1995. Geothermal heat pump performance. *Trans. Geothermal Resources Council*, 1995 Annual Meeting, Reno, NV
- Cui, P., Su, D., Sun, C., Fang, Z., 2003. Study on the application of a ground-source heat pump system in an indoor swimming pool (in Chinese). *Renew Energy*, 112(6), 8–21
- 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
- Energía geotérmica para climatizar la estación de Metro de Pacífico, 2010, disponible en <http://www.fundacionentorno.org/Casos-Empresariales/Climatizacion,estacion,Pacifico,mediante,energia,geotermica,METRO,MADRID,2934.htm>
- Figueroa, A., Marincic, I., Ochoa M., Rojas, J., 2010. Energía en edificaciones. En: Estrada C., Islas J., (eds.), *Energías Alternas: Propuesta de Investigación y desarrollo tecnológico para México*. Academia Mexicana de Ciencias, pp. 83-89.
- Fridleifsson, I.B., R. Bertani, E. Huenges, J. W. Lund, A. Ragnarsson, and L. Rybach 2008. The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. In: O. Hohmeyer and T. Trittin (Eds.) *IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources*, Proceedings, Luebeck, Germany, 20-25 January 2008, 59-80.
- Gao, Q., Li, M., Yu, M., Spitler, J.D., Yan, Y.Y., 2009. Review of development from GSHP to UTES in China and other countries. *Renew Sustain Energy Rev*, 13(6–7), 1383–1394
- Gan, G., Riffat, S.B., Chong, C.S.A, 1997. A novel rainwater–ground source heat pump – Measurement and simulation. *Applied Thermal Engineering*, 27, 430–441
- García-Gutiérrez, A., Barragán-Reyes, R.M., Arellano-Gómez, V., 2010. Research and development on heat pumps systems using geothermal energy, *Current Applied Physics*; 10, S123–S127.
- GEO, 1995. Geothermal heat pump: case studies of the West, *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 26(3), No. 1, Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, Klamath Falls, OR.
- Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, K., Ochifuji, K., 2007. Field performance of an energy pile system for space heating. *Energy Buildings*, 39(5), 517–524.
- Hochstein, M.P., Moore, J.N., 2008. Indonesia: geothermal prospects and developments. *Geothermics*, 37(3), 217–219
- HPC, 2010. How heat pumps achieve energy savings and CO2 emissions reduction: an introduction. In: *About Heat Pumps*, IEA-OECD Heat Pump Centre, disponible en: <http://www.heatpumpcentre.org/en/aboutheatpumps/howheatpumpsachieveenergysavings/Sidor/default.aspx>

- Hwang Y, Lee J.K., Jeong, Y.M., Koo, K.M., Lee, D.H., Kim, I.K., Jin, S.W., Kim, S.H., 2009. Cooling performance of a vertical ground-coupled heat pump system installed in a school building. *Renew Energy*, 34(3), 78–82.
- IEA, 2011. Technology Roadmap – Energy efficient buildings: heating and cooling equipment, International Energy Agency 2011, disponible en www.iea.org
- Johnston, I.W., Narsilio, G.A., Colls, S., 2011. Emerging geothermal energy technologies. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4), 643-653
- Kjellsson, E., Hellström, G., Perers, B., 2010. Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings. *Energy*, 35(6), 2667–73.
- Lamarche, L., Kaji, S., Beauchamp, B., 2010. A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems, *Geothermics* 39, 187–200
- Lund, J., 1990. Geothermal Heat Pump Utilization in the United States, Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, 11(1)1, Geo-Heat Center, Oregon Inst. of Technology, Klamath Falls, OR.
- Lund, J., 2007. Geothermal (Ground-source) Heat Pumps, Lecture presented at IIE, Cuernavaca, México, 2007.
- Lund, J., Freeston, D.H., Boyd, T.L., 2011. Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. *Geothermics*, in press.
- Mana, Y., Yang, H., Wang, J., 2010. Study on hybrid ground-coupled heat pump system for air-conditioning in hot-weather areas like Hong Kong, *Applied Energy* 87, 2826–2833
- Mañón, A., 2010. Un repaso a las bombas de calor. *Geotermia, Rev. Mex. Geoenergía*, 23, 76-85
- Michopoulos A, Bozis D, Kikidis P, Papakostas K, Kyriakis N.A., 2007. Three-years operation experience of a ground source heat pump system in Northern Greece. *Energy Buildings*, 39(3), 328–334.
- Omer, A.M., 2008. Energy, environment and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 2265-2300.
- O’Sullivan, M.J., Yeh, A., Mannington, W.I., 2009. A history of numerical modelling of the Wairakei geothermal field. *Geothermics*, 38(1), 55–68
- Rizzi, F., Frey, M., Iraldo, F., 2011. Towards an integrated design of voluntary approaches and standardization processes: An analysis of issues and trends in the Italian regulation on ground coupled heat pumps, *Energy Conversion and Management* 52, 3120–3131
- Sanner, B., Karystas, C., Mendrinós, D., Rybach, L., 2003. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe, *Geothermics*, 32, 579-588.

Sanner, B., Mands, E., Sauer, M.K., 2003. Larger geothermal heat pump plants in the central region of Germany. *Geothermics*, 32(4–6), 589–602

SENER, 2010. Balance Nacional de Energía 2009. Secretaría de Energía, México, DF, disponible en <http://www.sener.gob.mx/portal/Mobil.aspx?id=1791>

Serpen, U., Aksoy, N., Öngür, T., Korkmaz E.D., 2009. Geothermal energy in Turkey: 2008 update. *Geothermics*, 38(2), 227–237

Thain, I.A., Carey, B., 2009. Fifty years of geothermal power generation at Wairakei. *Geothermics*, 38(1), 48–63.

Williams, T., 2010. Ground-source heat pump roadmap, version 2.2, US-DOE-National Energy Laboratory, (disponible en <http://www.nrel.gov/geothermal>).

Yokoyama, R., Wakui, T., Kamakari, J., Takemura, K., 2010. Performance analysis of a CO₂ heat pump water heating system under a daily change in a standardized demand, *Energy*, 35(2), 718-728.

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, 3133-3140.