

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NOROESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

INSTITUTO DE POSGRADO

**ENERGÍA GEOTÉRMICA SOMERA, APLICACIÓN EN
DESARROLLOS URBANOS PLANIFICADOS Y ANÁLISIS
TÉCNICO-ECONÓMICO EN LA REGIÓN NOROESTE DE
LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES.**

IVÁN MARTÍN MONTECELLI

TESIS DE POSGRADO

MAESTRIA EN ENERGÍAS RENOVABLES Y SU GESTIÓN SUSTENTABLE

DIRECTOR: MG. ING. OSCAR SPADA

CO-DIRECTORA: DRA. ARQ. MELINA YULN

AÑO: 2023

A Paula
A mi familia

Índice

1	Introducción	7
1.1	Objetivo general.....	8
1.2	Objetivos específicos.....	8
1.3	Hipótesis.....	8
2	Antecedentes	9
2.1	Desarrollo en el siglo XX.....	13
2.2	En la actualidad	18
2.3	Capacidad geotérmica en Argentina.....	19
3	Marco teórico.....	23
3.1	Terminología	23
3.2	Conducción de Lord Kelvin, enfriamiento de la tierra	24
3.3	Movimiento de calor	25
3.3.1	Conducción.....	26
3.3.2	Convección	27
3.3.3	Radiación	29
3.4	La temperatura del suelo	30
3.5	Tipos de sistemas geotérmicos	31
3.5.1	Sistemas geotérmicos dominados por agua y vapor	32
3.5.2	Uso directo	33
3.5.3	Uso en cascada.....	34
3.6	Bombas de calor.....	35
3.6.1	Funcionamiento de las bombas de calor geotérmicas.....	35
3.6.2	Bomba de calor geotérmica vs. bombas de calor de fuente de aire.....	36
4	Materiales y métodos	41
4.1	Área de estudio	41
4.2	Análisis térmico de viviendas	43
4.3	Análisis de caso modelo	44
4.4	Selección de la bomba de calor.....	48
4.5	Estimaciones de costos	53
5	Resultados y discusiones.....	57

5.1	Viabilidad de la aplicación para la zona noroeste de Buenos Aires, Argentina, NOBA.....	57
5.2	Beneficios de la bomba de calor geotérmica	59
5.3	Economía de las bombas de calor geotérmicas	60
5.4	Evaluación del sitio para una bomba de calor geotérmica	61
5.4.1	Geología	61
5.4.2	Hidrología	61
5.4.3	Disponibilidad de terreno.....	62
5.5	Instalación de bombas de calor geotérmicas.....	62
5.6	Barreras o inconvenientes del sistema	63
5.6.1	Costos de capital (barrera del mercado).....	63
5.6.2	Disruptivo (barrera del mercado).....	63
5.6.3	Proximidad (Barrera del mercado).....	63
5.6.4	Pérdida/acumulación de calor	64
5.7	<i>District Heating</i> , Aplicación a barrios residenciales planificados.....	64
6	Conclusiones.....	66
7	Bibliografía	69

Lista de Figuras

Figura 1.	Casas ubicadas en Norfolk, en Inglaterra (entreplanos.com.ar).....	9
Figura 2.	Gráfico de plotter original de 1987 que muestra el desarrollo de la temperatura sin perturbaciones a lo largo de un pozo de 50 m de profundidad durante un año, desde agosto de 1986 hasta agosto de 1987, en la investigación de la estación GSHP de Schwalbach (García, 2021)	12
Figura 3.	Desarrollo de ventas de bombas de calor y precio del crudo en Alemania 1978-1990 (www.waermepumpe.de).....	16
Figura 4.	Evolución de las ventas de bombas de calor en Francia, Alemania y Austria 1976-1990 (www.waermepumpe.de).....	17
Figura 5.	Ejemplo de BHE coaxial (Kong, 2017).....	18
Figura 6.	Distribución de los sistemas geotérmicos en Argentina. (SEGEMAR. 2020).....	20
Figura 7.	Modelo conceptual de un pozo que extrae agua subterránea de un pozo no confinado acuífero. El agua extraída también lleva una carga de calor (advección) que se puede utilizar (Guía de la Energía Geotérmica, Madrid, 2008)	29
Figura 8.	Clasificación de la energía geotérmica según la temperatura (Fuente: Bayerisches Landesamt Für Umwelt, 2016).....	32
Figura 9.	Un diagrama de fase simplificado para el agua, que muestra las fases presentes a varias presiones y condiciones de temperatura. El líquido es la línea (azul) que divide los campos líquido y	

vapor; el sólido es la línea que divide los campos de hielo y líquido (verde). (Fuente: Propiedades termodinámicas del vapor por Keenan y Keyes, 2001).....	33
Figura 10. Uso directo de un fluido geotérmico de temperatura más baja para calentar espacios (Fuente: https://geotermiaonline.com/geotermiaonline/cambio-climatico/).	34
Figura 11. Los sistemas de bombas de calor geotérmicas, que consisten en el intercambiador de calor (izquierda) (IDEA, 2008) y la bomba de calor (derecha) (Clúster Eficiencia Energética Catalunya, 2019), calientan y enfrían una casa transfiriendo calor hacia y desde la tierra, respectivamente.	36
Figura 12. Sistema de circuito cerrado (Horizontal) (www.aires-acondicionados.info)	38
Figura 13. Sistema de circuito cerrado (Vertical). (www.aires-acondicionados.info).....	38
Figura 14. Sistema de circuito cerrado (Estanque/Lago). (www.aires-acondicionados.info).....	39
Figura 15. Sistema de circuito abierto. (www.aires-acondicionados.info)	40
Figura 16. Área de estudio	41
Figura 17. Temperaturas mínimas, medias y máximas en función del tiempo (1944-2010). La curva roja representa la temperatura media mensual y las curvas naranja y verde representan la temperatura máxima y mínima media mensual, respectivamente. La línea horizontal representa la temperatura media anual (Iannelli, 2013).....	42
Figura 18. Mapa de clasificación bio-ambiental. (IRAM nº11.603, 2012).....	43
Figura 19. Esquema de vivienda social. (Fuente: Autor)	45
Figura 20. Esquema de análisis térmico de paredes (Fuente: Autor)	46
Figura 21. Análisis térmico de vivienda.....	47
Figura 22. Esquemático de una bomba de calor. (www.caloryfrio.com).....	50
Figura 23. Ejemplo de bomba de calor moderna. (www.caloryfrio.com).....	51
Figura 24. Fórmula para el cálculo del COP (Fuente: Autor).....	52
Figura 25. Esquema de instalación de sondas geotérmicas (FOVISEE, 2016)	54
Figura 26. Datos obtenidos de temperaturas interiores (FOVISEE, 2016).....	55
Figura 27. Datos de temperaturas interiores (FOVISEE, 2016)	55

Índice de Abreviaturas

<i>Air Source Heat Pump</i> ASHP	36
<i>Borehole Heat Exchanger</i> BHE	8, 16
<i>Coefficient Of Performance</i> COP.....	14
Consejo Nacional de investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).....	21
<i>District Heating and Cooling</i> DHC	8
<i>Ground Source Heat Pump</i> (GSHP)	8
<i>Heating Ventilation Air Coindition</i> HVAC	58
<i>Low Temperature District Heating</i> LTDH.....	8
Organización de Países Exportadores de Petróleo OPEP	15
Programa de Suministro Eléctrico Fuentes Renovables (RenovAr)	21
Razón de Eficiencia Energética (EER).....	52
Servicio Geológico y Minero de Argentina (SEGEMAR)	21

Resumen

Las bombas de calor geotérmicas poco profundas, son una tecnología prometedora para contribuir a la descarbonización del sector energético. En climas dominados por la calefacción, el uso combinado de estas aplicaciones tanto para calefacción como para refrigeración aumenta su potencial técnico, definido como la energía máxima que se puede intercambiar con el suelo. Este trabajo propone un enfoque para cuantificar el potencial técnico y estimar la energía útil para abastecer las demandas energéticas de casas particulares y de barrios residenciales de vivienda social, como así también de proyectos privados, a escala regional. La energía útil se obtiene por el intercambio de calor directo, tanto para calefacción como refrigeración, particular o urbana. Los resultados pueden mostrar que, aunque estos sistemas funcionen para casas particulares según ciertas condiciones, aportando grandes ventajas y para barrios residenciales privados, aún falta mejorar y desarrollar las técnicas y tecnologías existentes para viviendas sociales, debido al alto costo de instalación inicial, pero esto no deja de ser una oportunidad para el desarrollo de estas temáticas.

1 Introducción

La energía geotérmica somera es una fuente prometedora de bajas emisiones de carbono para satisfacer las demandas de calefacción y refrigeración de edificios. Las bombas de calor geotérmicas verticales (*Ground Source Heat Pump* [GSHP]), son el tipo de sistema geotérmico poco profundo más utilizado en muchos países europeos (Lund & Toth, 2020). Estos sistemas intercambian calor con el suelo a través de uno o varios intercambiadores de calor de pozo (*Borehole Heat Exchanger* [BHE]), instalados a profundidades de hasta 400 metros (Florides & Kalogirou, 2007). Las temperaturas están aumentando y los eventos de calor extremo son cada vez más frecuentes debido al cambio climático.

Evaluar el potencial de los GSHP para calefaccionar barrios urbanos requiere (i) determinar la cantidad de calor disponible en el recurso, y (ii) vincular los posibles sistemas GSHP de los edificios. Mientras que los GSHP individuales están conectados directamente a un edificio cercano, la calefacción urbana y sistemas de refrigeración (*District Heating and Cooling* [DHC]) permiten transportar calor entre áreas con alto potencial geotérmico y áreas con alta demanda de energía (Werner, 2017). En particular, el DHC de cuarta generación, también conocido como calefacción urbana de baja temperatura (*Low Temperature District Heating* [LTDH]), se ha vuelto atractivo en Europa debido a la mejora de la eficiencia del sistema, la capacidad de integrar fuentes renovables y de baja temperatura y bajas emisiones de carbono (Lund et al., 2014; Garabetian et al., 2020). El DHC es, por lo tanto, una tecnología prometedora para aumentar el potencial geotérmico útil, definido como la energía útil para abastecer las demandas energéticas de los edificios.

Este documento presenta un marco para estimar la técnica y el potencial geotérmico superficial útil de GSHP para calefacción y refrigeración de espacios a nivel regional. El marco propuesto combina (i) el mapeo espacial entre demandas de energía del edificio y GSHP potenciales a escala regional y (ii) la optimización del suministro de calor para calefacción urbana y refrigeración (DHC). Siguiendo un escenario basado en este enfoque, se obtiene el potencial geotérmico superficial técnico y útil con y sin DHC, para niveles de penetración en el mercado de los sistemas de refrigeración de edificios y para escenarios de

cambios climáticos para la región noroeste de la provincia de Buenos Aires. Los resultados presentan la primera estimación a escala regional de potencial GSHP poco profundo que combina calefacción y refrigeración de espacios.

1.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es evaluar la viabilidad de instalar bombas de calor geotérmicas en viviendas, considerando los ahorros en costos y eficiencia energética que ofrecen en comparación con otros sistemas de calefacción, así como las desventajas y requisitos asociados a su instalación.

1.2 Objetivos específicos

- Explorar la disponibilidad del recurso en la región y su posibilidad de utilización y aprovechamiento
- Analizar la eficiencia energética de esta tecnología, comparando la climatización tanto en invierno como en verano, frente a la aplicación clásica de aires acondicionados.
- Determinar la viabilidad económica de su aplicación
- Conocer una nueva modalidad de sistemas de aclimatación de ambientes posiblemente replicable a otras construcciones, ya sea en viviendas particulares o edificios públicos.

1.3 Hipótesis

Es probable que las bombas de calor geotérmicas sean más eficientes y brinden ahorros económicos en comparación con otros sistemas de calefacción y refrigeración, siempre y cuando se tenga en cuenta el costo inicial, la disponibilidad de equipamiento y recursos, y la viabilidad técnica y geográfica para su instalación.

2 Antecedentes

Los cambios de temperatura en la superficie disminuyen en el interior del suelo, y por debajo de una profundidad de unos 10 - 20 m de la superficie, tiene una temperatura constante durante todo el año. Este hecho es utilizado por algunos animales, ya que también hay vida en el subsuelo, y desde tiempos prehistóricos también por el hombre, habitando en agujeros o cuevas para mantenerse fresco en un clima cálido, o caliente en inviernos fríos. En áreas con geología adecuada, ciudades completas fueron excavadas en la roca. Áreas con similitudes, de rocas volcánicas adaptadas en Nuevo México en USA, y en Capadocia en Turquía, han resultado con sorprendentes similitudes de “ciudades cueva”, donde la gente y su suministro de alimentos se mantiene confortable a pesar de las duras condiciones al medio ambiente. Antiguas casas rurales y cobertizos de almacenamiento en Islandia y el norte de Suecia solían ser en parte bajo tierra, como todavía se puede ver en algunos lugares (Figura 1).



Figura 1. Casas ubicadas en Norfolk, en Inglaterra (entreplanos.com.ar)

Una descripción científica de cambios en la disminución de la temperatura con respecto a la profundidad de la tierra se llevó a cabo a finales del siglo 17, cuando se tomaron lecturas de

temperatura en el sótano del “*Observatoire de Paris*”, y Antoine Lavoisier más tarde instaló un termómetro allí mismo. En Buffon (1778) se describe la lectura de temperatura constante a lo largo de las estaciones. Dos décadas después, el alemán Alexander Von Humboldt visita el lugar durante sus estudios en París. Von Humboldt (1799) afirma: “La temperatura promedio de las observaciones realizadas desde 1680 revela que es 12 °C, y las variaciones estacionales de temperatura se registran como un máximo de 0,04 °C.

En Escocia, las mediciones de la temperatura del suelo se han hecho desde 1838 durante muchos años por motivos del Observatorio Real de Edimburgo. Estos datos fueron utilizados tanto por Thomson, (1860) como por Everett (1860) para validar empíricamente sus fórmulas para la disminución de las variaciones de temperatura superficial hacia profundidad y el retardo de fase. Thomson (1860) calcula que la variación de temperatura es sólo 1/20 de la variación en la superficie en 8,1 m de profundidad, y 1/400 en 16,2 m de profundidad.

La temperatura en el reino geotérmico somero es también influenciada por el flujo de calor geotérmico y el gradiente geotérmico resultante. Con las minas explotando recursos cada vez más profundos, los mineros en la edad media comenzaron a sentir el calor geotérmico. El primero en atribuir esto a un calor de la tierra y dar una causa (un incendio interno) para esto fue Kircher (1665). También mencionó un gradiente geotérmico, citando informes de mineros en la región de Chemnitz, Alemania.

Pasaron más de cien años antes de que otro científico empezara a poner números al gradiente geotérmico. Buffon (1778) primero también cita relatos de mineros de Eller, Alemania: “*à mesure que les mineurs descendent, ils recontrent une température d'air toujours plus chaude*” (cuanto más profundo descendían los mineros, cuanto mayor es la temperatura del aire que encontraron). Luego enumera los valores para el aumento de temperatura con respecto a la profundidad, como las lecturas de Giromagny cerca de Belfort (tomado por De Gensanne) que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Aumento de temperatura con la profundidad como se indica en (Buffon, 1778) para Giromagny; valores originales convertidos a unidades modernas por el autor.

Profundidad (m)	Temperatura (°C)
101	12.5
206	13.1
307	19.0
432	22.7

Todavía la idea de un interior caliente de la tierra no estaba del todo aceptada a principios del siglo XIX. El registro de temperaturas subterráneas tenía la intención de probar o contradecir ese concepto. El trabajo de (Kupffer, 1829), (Reich, 1834) y (Bischof, 1837) proporcionan una gran cantidad de datos, que muestran gradientes geotérmicos de 2 - 4 K por 100 metros. (Bischof, 1837) parece ser el primero en comprender que también la conductividad térmica de las rocas influye en el valor del aumento de temperatura hacia la profundidad de la tierra. Hacia finales del siglo XIX, (Lebour, 1882) puede presentar 57 series de datos de temperatura subterránea, principalmente de Francia e Inglaterra, y obtiene gradientes geotérmicos de 1,1- 6,4 K por 100 m de estos datos. Las pendientes más altas, de más de 5 K por 100 m, se encontraron en minas en Cornwall.

Los efectos de las variaciones estacionales de la temperatura superficial y el flujo de calor geotérmico desde abajo, controlan los sistemas geotérmicos someros. La distribución de temperatura típica resultante de la interacción de estos factores se muestra en la Figura 2. A finales del siglo XIX, estos factores fueron bastante aceptados.

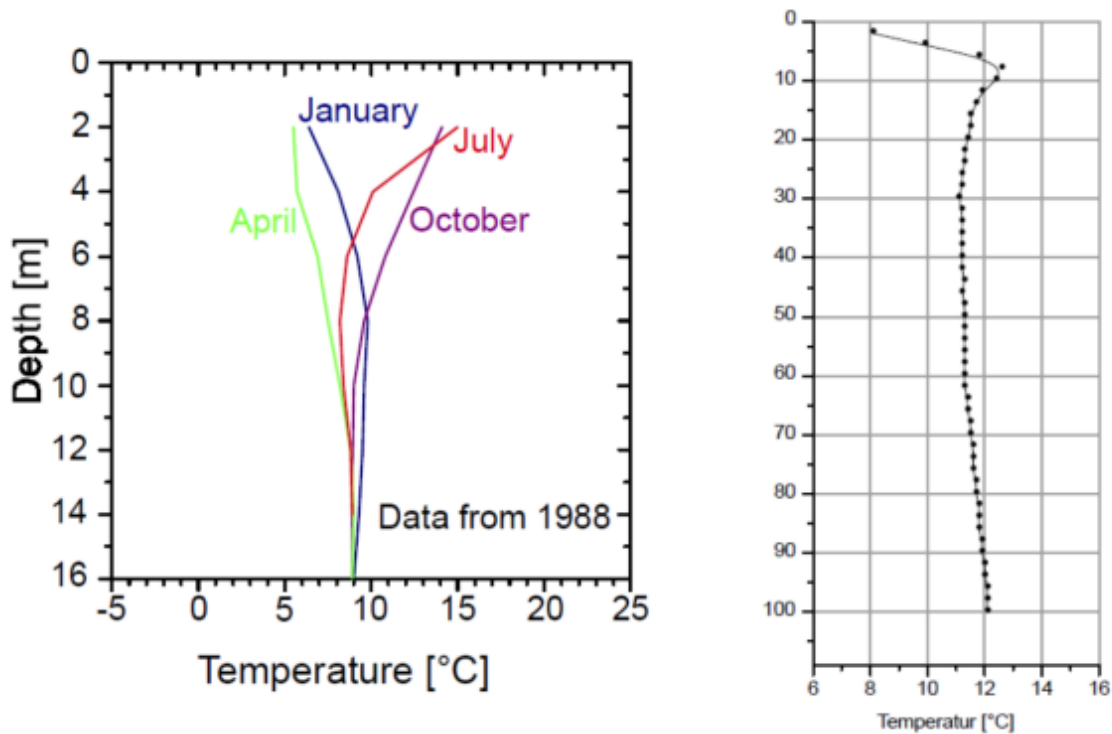


Figura 2. Gráfico de plotter original de 1987 que muestra el desarrollo de la temperatura sin perturbaciones a lo largo de un pozo de 50 m de profundidad durante un año, desde agosto de 1986 hasta agosto de 1987, en la investigación de la estación GSHP de Schwalbach (García, 2021)

Con el fin de utilizar activamente el subsuelo poco profundo para producción o almacenamiento de energía, se requiere una herramienta para el cambio de temperatura, la bomba de calor para aumentarla, y la enfriadora (o una bomba de calor en modo inverso) para temperatura decreciente. Una visión temprana de tal máquina con dos cilindros en serie está dada por (Thomson, 1853), los procesos están destinados tanto a calefacción y refrigeración. En una nota añadida al artículo de 1881 de Thomson, escribe que las máquinas basadas en este principio se utilizaron para enfriar, por ejemplo, carne para el transporte en barcos, y continúa: “El método de calentar el aire descrito en el artículo permanece no realizado hasta el día de hoy”.

La aplicación práctica de los procesos termodinámicos fue desarrollada en la segunda mitad del siglo XIX, principalmente para refrigeración (por ejemplo, producción de hielo). Los fluidos de trabajo fueron vapor de agua, éter metílico, dióxido de carbono y amoníaco.

Hoy en día se acepta generalmente que la primera práctica de la aplicación del principio de la bomba de calor fue realizada por (Rittinger, 1855), usando compresión de vapor en un circuito discontinuo cerrado para evaporar el agua y así producir sal a partir de salmuera concentrada en la fábrica de sal Ebensee en Austria. Explicó su idea con las siguientes palabras “El vapor puede generar trabajo mecánico, pero casi ningún físico dudará de la frase expresada en el sentido inverso, el trabajo mecánico puede generar vapor” (Rittinger, 1855). El compresor fue accionado por agua, un recurso fácilmente disponible en el área, y, por lo tanto, se podría ahorrar valiosa leña con el proceso. Se dice que la bomba de calor tenía una capacidad térmica de 14 kW (Zogg, 2008).

2.1 Desarrollo en el siglo XX

El desarrollo hasta la primera crisis del precio del petróleo 1973. Es sabido que el 13 de febrero de 1912, una patente en que se describe una bomba de calor geotérmica fue solicitada por Heinrich Zoelly, de cierta fama para el diseño de turbinas de agua, de vapor y el desarrollo de locomotoras a turbinas de vapor. La reivindicación principal en esta patente suiza N° 59350, otorgada en 1919, fue como sigue (citado después de (Wirth, 1955); traducción por el autor:

“Heizverfahren, dadurch gekennzeichnet, dass man durch einen Elektromotor einen Kompressor treibt, welcher einen Wärmeträger in einem Kreisprozess fördert, dessen Verlauf gleichartig ist mit demjenigen, den der Kälte­träger durch die Tätigkeit einer Kompressionskältemaschine erfährt, wobei Mittel vorgesehen sind, a den Wärmeträger aus dem Erdboden Wärme aufnehmen zu Lassen”.

“Método de calentamiento, caracterizado porque un compresor es accionado por un motor eléctrico, el cual promueve un portador de calor en un proceso cíclico, su curso es similar al que experimenta el portador de frío mediante el funcionamiento de una máquina de refrigeración por compresión, disponiéndose medios para extraer el portador de calor del suelo para absorber el calor”.

Para la calefacción doméstica, las bombas de calor se aplicaron por primera vez en la década de 1930, por ejemplo, en 1938 en Zúrich, Suiza, donde el ayuntamiento fue calentado por una bomba de calor utilizando agua de río como fuente de calor, con temperaturas de entrada del agua tan bajas como 1,2 °C en invierno (Egli, 1944) – no un sistema geotérmico por definición, pero “hidrotermal” en cuanto a la Directiva de la UE 2009/28/UE sobre energías renovables. La bomba de calor suministró hasta 100 kW de calor y logró un coeficiente de rendimiento (*Coefficient Of Performance* [COP]) anual de casi 2.2 (incluyendo la bomba de agua del río) en 1938/39 (Zogg, 2008). Más bombas de calor se instalaron para otros edificios en Zúrich, por la restricción al suministro de carbón desde el exterior durante la Segunda Guerra Mundial: para una piscina cubierta en 1941; para suministro a la calefacción urbana neta en 1942; y para dos edificios de la administración de la ciudad en 1943/44. La bomba de calor en el ayuntamiento tuvo una vida útil muy larga de 63 años, con el compresor reemplazado en 1964, antes de ser retirado en 2001. Todavía estaba operativo con fines patrimoniales en 2008 (Zogg, 2008).

Inmediatamente después de la guerra, solo unas pocas bombas de calor se instalaron en Europa. Se utilizan aguas subterráneas como fuentes para bombas de calor (por lo tanto, geotérmica por definición) alrededor de 1950 en Thun, Suiza (Zogg, 2008). La capacidad de calentamiento de 440 kW, y la baja temperatura de suministro al sistema de calefacción de 40 °C, inusual para ese tiempo, permitió un excelente COP anual de 4.5.

Al otro lado del Atlántico, en los años entre 1945 y los primeros años de la década de 1950 fueron un apogeo en el desarrollo de las bombas de calor. Se instaló la primera bomba de calor geotérmica verdadera en Indianápolis en 1945 (Crandall, 1946), un sistema de expansión directa con tuberías horizontales en el suelo. El desarrollo se multiplicó, y también el trabajo teórico para los métodos de diseño de bucle de tierra iniciados. La bomba de calor geotérmica más grande de esa época fue construida en 1948 como una bomba de calor de agua subterránea para el *Equitable Building*, en Portland OR (ASME, 1980). En Europa este desarrollo fue ignorado principalmente en el difícil tiempo de la posguerra. Los años de bajos precios del combustible en las décadas de 1950 y 1960 ocasionaron que el desarrollo en

América se detuviera, e impidió el interés en bombas de calor en Europa, y resultó en el retiro de muchas bombas de calor geotérmicas existentes.

Desarrollo durante la primera y segunda crisis de precios del petróleo, 1973-1985. En octubre de 1973, la Organización de Países Exportadores de Petróleo OPEP decidió una reducción de suministro de petróleo a los países occidentales como retribución a Occidente apoyando a Israel en la guerra de Yom-Kippur. Los precios del petróleo se dispararon y se buscaron alternativas. Es mucho más fácil de reemplazar el petróleo en aplicaciones estacionarias como la calefacción que en el transporte, y por lo tanto las bombas de calor se hicieron populares como opción de calefacción. Tomó algún tiempo después de 1973 para desarrollar el equipo necesario, y así las bombas de calor estuvieron disponibles a tiempo para la segunda crisis del precio del petróleo en 1980/81, provocada por la revolución en Irán y la subsiguiente guerra Irán-Irak. Las ventas de bombas de calor y la evolución del precio del petróleo en Alemania se puede ver en la Figura 3.

En realidad, el desarrollo ya había comenzado antes del choque de precios del petróleo. La primera bomba de calor geotérmica en Alemania, utilizando bucles horizontales, entró en funcionamiento ya en 1969 (Waterkotte, 1972). Siguieron después pozos de agua subterránea como fuente de calor (Drafz, 1972). El número de publicaciones sobre diferentes tipos muestra claramente que el tipo intercambiador de calor de pozo, (Borehole Heat Exchanger BHE), siguió varios años después. La forma del gráfico claramente refleja el auge de las bombas de calor alrededor de 1980, como se ve en Figura 3.

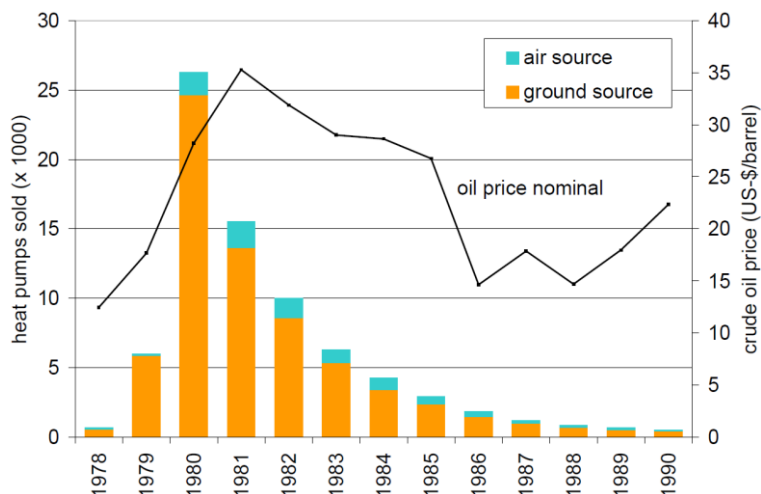


Figura 3. Desarrollo de ventas de bombas de calor y precio del crudo en Alemania 1978-1990 (www.waermepumpe.de).

Así, para la segunda crisis de los precios del petróleo, las bombas de calor estuvieron disponibles en fábricas grandes y pequeñas, especialmente en Austria, Francia, Alemania, Suecia, Suiza, entre otros. En Alemania, la mayoría estaban acoplados a bucles horizontales o pozos de agua subterránea, algunos utilizaban aire como fuentes de calor. Se instalaron muchas bombas de calor en sistemas bivalentes como adición a las calderas existentes, causando problemas en el control, hidráulica, y niveles de temperatura. La falta de experiencia, calidad, conocimiento de los instaladores, etc. arruinó la reputación de las bombas de calor en Alemania alrededor de 1980, y las cifras de ventas cayeron antes de que lo hiciera el precio del petróleo. Un desarrollo similar ocurrió en Francia, siendo el pico un poco más tarde, y en Austria, donde los números absolutos fueron más bajos y la disminución menos drástica (Figura 4). Empresas más pequeñas simplemente desaparecieron, y los grandes fabricantes de calderas, habiendo comenzado también con las bombas de calor, cerraron sus respectivos departamentos. Sólo unas pocas empresas con buen conocimiento y experiencia, y suficiente persistencia, continuaron y se convirtieron en el núcleo de la evolución positiva después de 1990.

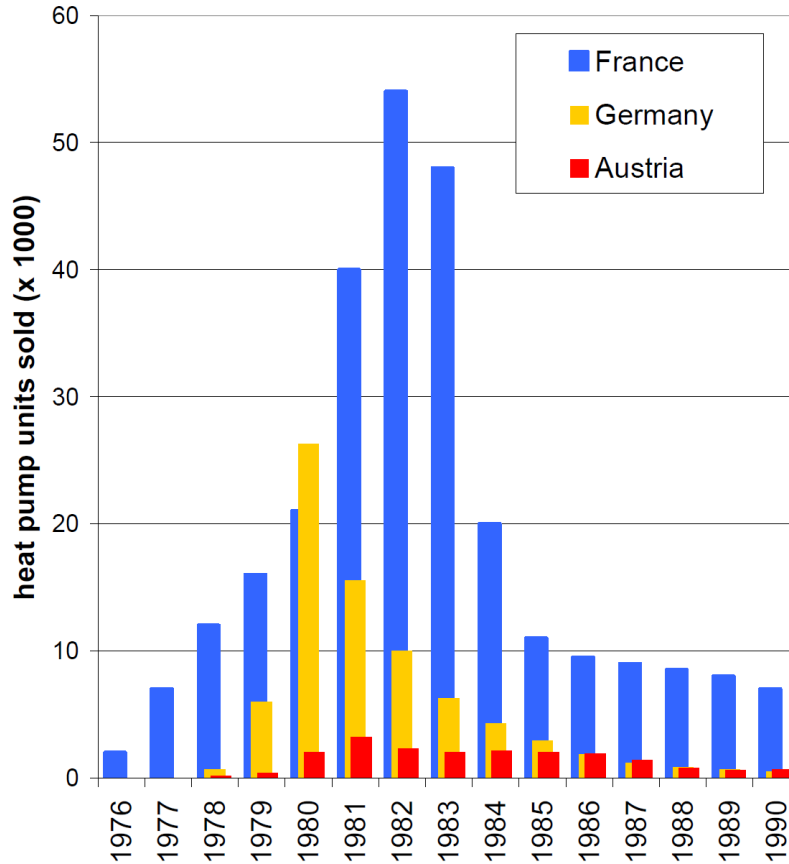


Figura 4. Evolución de las ventas de bombas de calor en Francia, Alemania y Austria 1976-1990 (www.waermepumpe.de)

Los intercambiadores de calor de pozo tuvieron su comienzo justo durante la época de crisis del petróleo. Los primeros experimentos se informan desde el Reino Unido, Países Bajos y Suecia. En Alemania, los primeros BHE fueron instalados a finales de la década de 1970, pero no documentados en publicaciones. El primer documento alemán (occidental) sobre regulación de GSHP (LAWA, 1980), editado por el grupo de trabajo conjunto sobre el agua del estado por la pertinente autoridad, se ocupó principalmente de las bombas de calor de agua subterránea, pero también incluye algunas páginas sobre la “nueva tecnología” de BHE, que muestra un BHE coaxial como ejemplo (Figura 5).

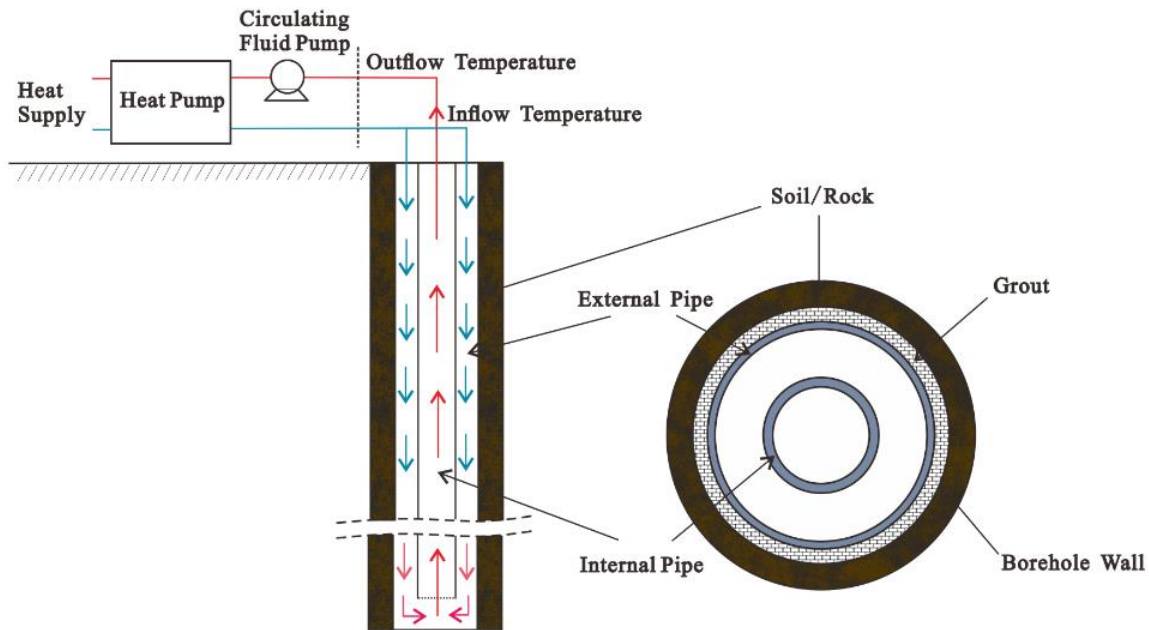


Figura 5. Ejemplo de BHE coaxial (Kong, 2017).

Un folleto de una empresa alemana (WTA, 1981) muestra fotos de perforación e instalación para un coaxial BHE, hecho de acero inoxidable corrugado para el tubo exterior y una manguera de goma para el tubo interior. El primero de los experimentos suizos también comenzaron alrededor del mismo tiempo, con el primer BHE moderno hecho de tubos instalados en 1980 (Rohner, 1991); Austria siguió poco después.

Como resultado del desastre del mercado, en Alemania se utilizaron enfoques más cautelosos. En Suecia, sin la caída de ventas como la de Francia y Alemania, se dio la investigación y el desarrollo (I + D) adecuada, siguiendo esta práctica también otros países. Numerosas conferencias y talleres permitieron el intercambio de experiencias y nuevos descubrimientos.

2.2 En la actualidad

El mercado alemán de GSHP desde la década de 1970 aclara muy bien algunos factores que influyen en las ventas, como eventos en los mercados mundiales, I+D, estándares e incentivos. El mercado en Alemania fue desarrollado rápidamente en los primeros años del

nuevo milenio y tuvo otro pico alrededor de 2006-2008. Una de las razones fue la inseguridad en el suministro de gas natural de Rusia, que había reemplazado al petróleo en la mayoría de las casas en Alemania. Desde entonces las cifras de ventas de GSHP están disminuyendo, mientras que la participación de bombas de calor de fuente de aire está creciendo. En 2015, por primera vez, menos del 30% de las bombas calor nuevas en Alemania utilizaron una fuente geotérmica. Se puede observar una tendencia similar, pero más lenta, en Suiza, donde se muestra aproximadamente el 36% del mercado de este tipo de bombas de calor geotérmicas. La situación en toda Europa es bastante diversa, con algunos países mostrando un gran número de instalaciones. (Aditya & Narsilio, 2020)

Un desafío específico para el mercado de GSHP de hoy en día en Europa es el bajo porcentaje de obra nueva. Esto requiere abordar el parque inmobiliario existente, un sector en el que las instalaciones geotérmicas no son fáciles de implementar. En Sudamérica y sobre todo en Argentina, esto no ocurre así, aún en vías de expansión de terrenos y con fuerte crecimiento de obra nueva, la instalación de bombas y pozos geotérmicos puede suponer un gran avance.

2.3 Capacidad geotérmica en Argentina

Los países andinos de América del Sur constituyen sitios prometedores para la exploración geotérmica debido a su posición sobre el Anillo del Pacífico de Fuego, donde las características magmáticas y tectónicas favorecen el desarrollo de sistemas geotérmicos. La estimación de Vieira y Hamza (2019) que todo el continente sudamericano alberga alrededor de $5226 \times 1,012$ GJ como base de recursos geotérmicos (a profundidades no superiores a tres kilómetros), donde la región andina representa más de 294 GJ/m² (base de recursos por unidad de área). A pesar de la existencia de este recurso en América del Sur, actualmente sólo una planta geotérmica está produciendo energía eléctrica en todo el continente, es la planta de energía geotérmica instalada recientemente (septiembre de 2017) Cerro Pabellón de 48 MWe, en Chile (Aravena et al., 2016). Previo a esto, una unidad prototipo binaria de 0.67 MWe estuvo en operación por un corto período de tiempo hasta 1996 (Bertani, 2010) en el campo geotérmico Copahue (Provincia de Neuquén, Argentina). En particular, Argentina tiene un potencial geotérmico estimado de 490 – 2,010 MWe (Bona

y Coviello, 2016); sin embargo, actualmente este recurso solo se utiliza para uso directo (Fig. 1) como balneología (52,7 %), uso doméstico (24,6 %), calefacción del hogar (4,6 %), invernaderos (4,5 %), acuicultura (1,5 %), usos industriales (6,7 %) y deshielo (5,4%).

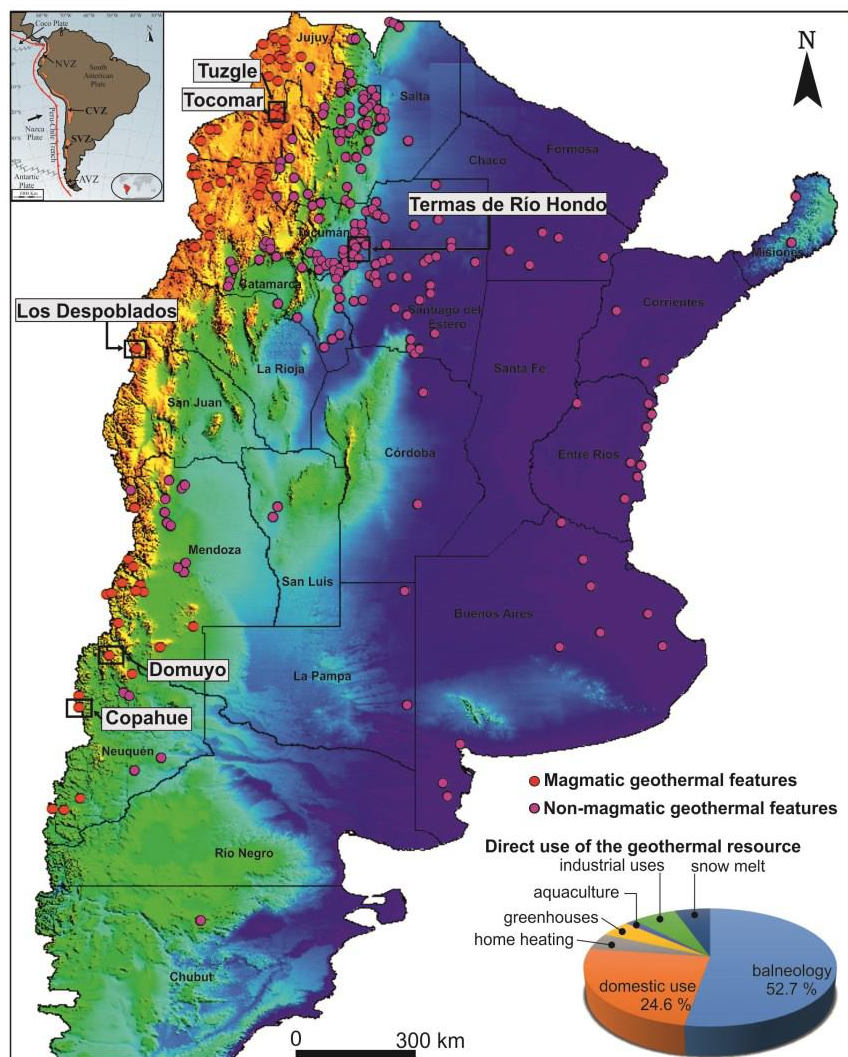


Figura 6. Distribución de los sistemas geotérmicos en Argentina. (SEGEMAR, 2020)

Durante los últimos años, ha habido un renovado interés por desarrollar nuevas fuentes de energía en Argentina, lo que se ha traducido en un cambio significativo en la matriz de generación eléctrica. Mediante la Ley 27.191 y el “Programa de Suministro Eléctrico de Fuentes Renovables (RenovAr)”, el gobierno nacional adjudicó 147 proyectos equivalentes a 4466.5 MW de capacidad instalada en diferentes tecnologías (eólica, solar, biomasa,

biogás y pequeñas centrales hidroeléctricas). Sin embargo, la energía geotérmica no se había incluido en las tecnologías a licitar. En este marco, el gobierno trabaja para licitar la primera Energía Contrato de Compra de Energía geotérmica para el “Proyecto Geotérmico Copahue”, único en etapa de factibilidad del país. De esta forma, se pretende incentivar el desarrollo de otros proyectos geotérmicos en la etapa de prefactibilidad para escenificar y promover el desarrollo de la geotermia en Argentina. “El Consejo Nacional de investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y el Servicio Geológico y Minero de Argentina (SEGEMAR)” son las principales organizaciones que promueven la I+D+I de los recursos geotérmicos en Argentina, a través del financiamiento de proyectos de investigación orientados a contribuir y ampliar la base de conocimiento necesaria para una evaluación más precisa del potencial geotérmico y, en última instancia, la implementación del recurso geotérmico como una alternativa energética viable. En este sentido, investigaciones recientes han aportado nueva información que ha permitido mejorar el estado de conocimiento del recurso geotérmico a nivel nacional.

El país continúa desarrollando sus recursos tanto de alta entalpía como de baja entalpía, en especial, más recientemente, en nuevas áreas asociadas a cuencas sedimentarias. Esto ha permitido el desarrollo de complejos terapéutico-recreativos que buscan generar nuevas fuentes de ingresos para la región. Se están desarrollando y poniendo en marcha una serie de nuevos recursos de baja entalpía en la producción para posibles aplicaciones de uso directo. Estos incluyen 10 áreas en las provincias de Córdoba, Corrientes, Misiones y Buenos Aires que están en desarrollo y cuatro áreas en las provincias de Buenos Aires y Corrientes que están en producción. (Canter, 2018)

Muchos de estos proyectos están muy cerca de los grandes centros de población de Buenos Aires y Gran Buenos Aires (más de 20 millones de habitantes). Otros desarrollos se ubican en las regiones de Mesopotamia y Pampa Húmeda, principalmente en forma de complejos recreativos terapéuticos. Se informa que un total de 72 sitios utilizan agua geotérmica para uso directo que varía en temperatura de 24 a 75 °C. Se utilizan tres sitios para calefacción de espacios individuales, dos para calefacción de invernadero, dos para piscicultura, uno para derretimiento de nieve, 67 para baño y natación y dos para otros usos (cría de animales).

El uso de bombas geotérmicas es relativamente nuevo en Argentina, los primeros comercios que proyectan el desarrollo datan de 2021, pretendiendo expandirse e instalar esta tecnología como alternativa de desarrollo en sistemas de acondicionamiento de aire. (caloryfrio.com, s.f.)

3 Marco teórico

La familiarización del término energía geotérmica, probablemente evoca imágenes de volcanes o de centrales eléctricas con nubes de vapor, profundos pozos, turbinas y agua caliente. Sin embargo, este no es el caso, se trata principalmente de la ciencia relativamente nueva de la termo-geología. La termo-geología implica el estudio de la llamada fuente de calor del suelo: la forma mundana de calor que se almacena en el suelo a temperaturas regulares. El calor de la fuente terrestre es menos conocido que la energía geotérmica de alta temperatura, y su uso en el campo de la calefacción es a menudo invisible para aquellos que no están familiarizados. Es muy importante, sin embargo, su existencia y es accesible en todas partes. Realmente ofrece un medio interesante para proporcionar calefacción y refrigeración de espacios, con eficiencia en liberación de CO₂.

3.1 Terminología

Energía geotérmica y calor geotérmico

Para este desarrollo se tiende a utilizar los términos energía geotérmica y geotermia para describir la energía de alta temperatura que:

- se deriva del flujo de calor del interior profundo de la tierra;
- se encuentra en perforaciones muy profundas o en ciertos lugares específicos en la corteza de la tierra.

Sin embargo, la Unión Europea ha anunciado recientemente que las fuentes subterráneas poco profundas de calor también se clasifican como energía geotérmica. “La Directiva de Energías Renovables de la UE 2009/28/CE” establece que:

“**energía geotérmica** significa energía térmica almacenada en superficie de la tierra sólida y que se aprovecha mediante la transferencia de calor”.

Para este estudio, los términos calor de fuente terrestre y termo-geología es para describir el calor de baja entalpía, o energía geotérmica somera, que:

- ocurre de manera ubicua a temperaturas “normales” en el subsuelo relativamente poco profundo;
- puede contener un componente de energía geotérmica genuina de las profundidades del flujo de calor de la tierra, pero por lo general será dominado por la energía solar que ha absorbido y almacenado en el subsuelo.

3.2 Conducción de Lord Kelvin, enfriamiento de la tierra

Como se ha mencionado en el capítulo de los antecedentes, desde que se inició la minería profunda en los siglos XVI y XVII, era sabido que la tierra se calentaba a medida que aumentaba la profundidad, mientras que, en 1740, las primeras mediciones geotérmicas fueron tomadas por de Gensanne en una mina francesa (Prestwich, 1885; Dickson y Fanelli, 2004). En otras palabras, poco a poco se hizo evidente que hay un gradiente geotérmico. La ley de Fourier nos dice que, si existe un gradiente geotérmico y si las rocas tienen una capacidad finita para conducir el calor, entonces la tierra debe conducir el calor de su interior a su exterior:

$$Q = K * A \frac{d\theta}{dz} \quad \text{Ley de Fourier} \quad (1)$$

donde Q = flujo de calor (W), A = área de la sección transversal (m²), θ = temperatura (°C o K), z = coordenada de profundidad (m) y K = conductividad térmica (Wm⁻¹ K⁻¹) de las rocas. Desde aquí hay un pequeño salto a la deducción de que la tierra está perdiendo calor y enfriándose. Es exactamente esta lógica la que William Thomson (luego Lord Kelvin) había utilizado a mediados del siglo XIX para deducir la edad de la tierra, apostando su pretensión de ser el primer termo-geólogo del mundo (Thomson, 1860). A ese tiempo, Thomson y muchos otros geólogos sospecharon que la tierra había nacido como un globo de roca fundida

y posteriormente se había enfriado. Ellos creían que el gradiente geotérmico observado se debió al calor residual en el interior de la tierra filtrándose gradualmente hacia el espacio a través de una litosfera sólida. A medida que se perdía el calor, el espesor de la litosfera aumenta a expensas del interior fundido.

Thomson trató de calcular la edad en que se formó la corteza terrestre, haciendo suposiciones sobre la temperatura inicial del interior de la tierra (alrededor de 7000 °F, la cual es más caliente que la temperatura actual de la superficie, o algo más de 4100 K); y una estimación razonable de la difusividad térmica de las rocas. En 1862, pudo concluir que la edad de la tierra, es decir, el tiempo que tardaría en enfriarse hasta la temperatura actual observada y el gradiente geotérmico, estuvo en algún lugar entre 20 y 400 millones de años.

La estimación de Thomson finalmente resultó ser una gran subestimación: actualmente se considera que la tierra tiene alrededor de 4,500 millones de años. Como resultado, Thomson a veces es ridiculizado por los modernos geólogos, pero sus cálculos eran fundamentalmente correctos, dado el conocimiento y modelo conceptual que tenía en ese momento. Ahora se sabe que el interior de la tierra se mantiene caliente por la continua desintegración de radio-nucleídos, isótopos de uranio (^{238}U y ^{235}U), potasio (^{40}K) y torio (^{232}Th); por lo tanto, se enfría mucho más lento que la predicción de Thomson. Pero Thomson no podía saber esto: la radiactividad solo fue descubierta por Antoine Henri Becquerel en 1896, y los elementos radiactivos solo fueron aislados por Marie y Pierre Curie en 1902.

3.3 Movimiento de calor

No es suficiente saber que las rocas, los sedimentos y las aguas subterráneas en el subsuelo de la tierra almacenan calor, también hay que entender cómo el subsuelo absorbe y pierde calor, y cómo se puede inducir el calor para que se mueva a lugares donde se pueda extraer. El calor es transferido por tres mecanismos principales:

- conducción (ley de Fourier, Ecuación 1);
- convección;

- radiación.

En el entorno del subsuelo poco profundo, la conducción a través de minerales o fluidos porosos y la convección a través de las aguas subterráneas son probablemente los dos mecanismos más importantes del flujo de calor. En algunos casos, la radiación también puede ser importante, así que debe ser también considerada.

3.3.1 Conducción

La conducción de calor describe el proceso por el cual el calor se difunde a través de un sólido, líquido o gas por procesos de interacción molecular. Dicho de manera simple, si se calienta un extremo de un trozo de granito, las moléculas en ese extremo comienzan a vibrar con más fuerza. Estos átomos o moléculas que vibran hacen que sus vecinos también comiencen a vibrar, por lo que la energía térmica (y la temperatura) se difunde gradualmente por todo el trozo de roca. Es este proceso el que describe la ley de Fourier mediante la Ecuación 1.

La conductividad térmica describe qué tan bueno es el medio para conducir el calor: el cobre es muy bueno, las rocas son menos buenas y los plásticos son generalmente malos. Las conductividades térmicas de las rocas y otros materiales geológicos tienden a caer dentro de un rango bastante estrecho, típicamente entre 1 y 3 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Notar que, de los minerales formadores de rocas comunes, el cuarzo tiene la conductividad térmica más alta, alrededor de 7 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Así, la conductividad térmica de las rocas depende en gran medida en su contenido de cuarzo.

La conductividad térmica de la mayoría de los minerales formadores de rocas es bastante buena (especialmente el cuarzo), el agua tiene una conductividad térmica más baja, mientras que el aire es muy pobre. Por lo tanto, los mejores conductores geológicos son rocas con baja porosidad y un entrelazado denso de estructura cristalina con un alto contenido de cuarzo, como el granito. Las rocas porosas, donde los poros están saturados de agua son menos buenos conductores: en las aguas saturadas las arcillas tienden a tener conductividades en el

rango de $1.5 - 2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, por ejemplo, mientras las arenas de cuarzo saturadas pueden tener una conductividad algo mayor. Lo peor son los conductores con sedimentos secos y porosos, como arenas y limos secos y bien clasificados ($< 1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ en el peor de los casos). Sin embargo, los sedimentos naturales son rara vez completamente secos: aunque no estén saturados de agua, por lo general contiene algo de humedad del suelo. Los suelos y sedimentos de grano fino (arcillas y limos) son por lo general mejores para retener la humedad que las arenas y gravas, cuando se encuentran por encima del nivel freático. Farouki (1982) proporcionó tablas útiles de la variación de la conductividad con la compactación de sedimentos y el contenido de humedad.

La conductividad térmica también depende de la fase de un material: por ejemplo, la conductividad térmica del hielo es mucho mayor que la del agua, por lo tanto, la conductividad térmica de los suelos y sedimentos tiende a aumentar cuando se congelan.

3.3.2 Convección

Los fluidos almacenan calor: por ejemplo, el agua almacena alrededor de 4180 JL^{-1} por cada $^{\circ}\text{C}$ de temperatura. Así, al trasladar agua caliente de una sala de calderas a un baño, también existe calor en movimiento. El transporte de calor que ocurre en virtud del movimiento de un flujo se denomina convección. Al bombear agua caliente de un lugar a otro, se llama transporte de calor por convección forzada o advección, porque el calor fluye debido a una fuerza externa impuesta sobre el fluido portador. Isaac Newton propuso una fórmula simple para la velocidad a la que el calor se transfiere a los cuerpos o se aleja de ellos en una corriente de fluido en movimiento. Esta fórmula (Ley de enfriamiento de Newton) se puede expresar de la siguiente forma:

$$q^* = \bar{h} \cdot (\theta_{masa} - \theta_{fl}) \quad (5)$$

Donde:

q^* es la transferencia de calor del cuerpo al fluido en Wm^{-2} de área superficial;
 h es el coeficiente local de transferencia de calor ($Wm^{-1}K^{-1}$), que dependerá de la naturaleza del flujo, su tasa de flujo, las propiedades de la superficie del cuerpo, etc.;
 θ_{masa} y θ_{fl} son las temperaturas del cuerpo y del fluido, respectivamente.

La Ley de Enfriamiento de Newton es realmente una aproximación de trabajo en lugar de una ley. Eso funciona bastante bien para situaciones de convección forzada donde la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el flujo no es demasiado grande.

La transferencia de calor por convección también puede tener lugar desde un cuerpo caliente en un fluido que está inicialmente estático, sin fuerzas impuestas desde el exterior. Imaginar encender una barra de fuego en un salón: el aire cerca de la barra se calienta (por conducción y radiación) y se expande ligeramente. Por lo tanto, se vuelve menos denso que el que rodea el aire y comienza a ascender, siendo desplazado por aire frío más denso. Este nuevo aire frío pronto se calienta sube y sube y, antes de darse cuenta, una celda de convección ha comenzado dentro de la habitación. La barra de fuego proporciona la fuente de calor. En última instancia, el calor puede perderse del aire a un techo, una ventana o pared externa, pero el transporte de calor con flujo (aire) ha tomado lugar. A esto se le llama “convección libre”.

En la ciencia aplicada de la termo-geología, se necesita saber acerca de la convección forzada de calor que se produce con el flujo de agua subterránea. En las aguas poco profundas, los flujos subterráneos desde áreas de mayor altura son, por lo general, impulsadas por fuerzas gravitatorias, al hacerlo, lleva consigo una enorme carga de calor (alrededor de $4,2 kJK^{-1}L^{-1}$). Si se perfora bien y se empieza a bombear, localmente se reduce la masa de agua subterránea, formando un cono de depresión (Figura 7), causando que el agua subterránea fluya hacia el pozo, donde se puede extraer. El agua se puede utilizar para beber, para uso doméstico o industrial, pero también se puede extraer la carga de calor que transporta y usarla también.

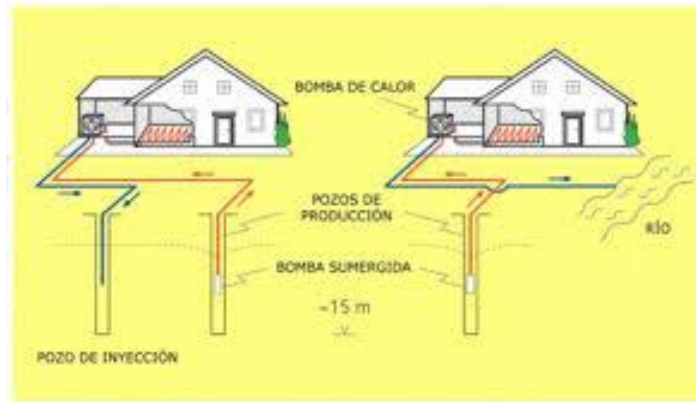


Figura 7. Modelo conceptual de un pozo que extrae agua subterránea de un pozo no confinado acuífero. El agua extraída también lleva una carga de calor (advección) que se puede utilizar (Guía de la Energía Geotérmica, Madrid, 2008)

3.3.3 Radiación

Todos los cuerpos irradian energía en forma de radiación electromagnética: estrellas, humanos, lagos y la superficie de la tierra. Cuanto más caliente está el cuerpo, más energía irradia. De hecho, Stefan (a través del trabajo experimental en 1879) y Boltzmann (a través de la consideración teórica, en 1884) afirmaron que, para un cuerpo idealmente radiante (el llamado cuerpo negro), la energía radiada (E_b) es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta (θ° , en Kelvin):

$$E_b = \sigma(\theta^\circ)^4$$

donde σ es la constante Stefan – Boltzmann de $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

Los cuerpos calientes irradian energía electromagnética a través de un amplio espectro de longitudes de onda: la radiación del sol está, por ejemplo, dominada por los rayos ultravioleta, longitudes de onda visibles e infrarrojas. Sin embargo, en general, cuanto más caliente está el cuerpo, más corta es la longitud de onda modal (es decir, la longitud de onda de la intensidad máxima) en el espectro de radiación; esto se conoce como la ley de Wien. Por lo tanto, las estrellas más calientes tienen un tono azulado y las más frías, son rojas. Se sabe que una herradura en el horno del herrero brilla “al rojo vivo”, también está irradiando calor en el espectro visible.

A temperaturas más familiares, como la del propio cuerpo o la del suelo, el calor se irradia principalmente en la parte infrarroja invisible del espectro. La superficie de la tierra irradia esa energía térmica, y una cámara infrarroja (tal vez un satélite montado) es capaz de sentir tal radiación y compilar mapas de temperatura de la tierra superficie.

El calor que se siente en la piel o que es absorbido por el suelo en un día soleado es la radiación infrarroja emitida por el sol (junto con la luz visible). Así, la radiación del calor y la absorción de la energía radiada por el sol y la atmósfera son importantes mecanismos de transferencia de calor en la superficie de la tierra, particularmente cuando se considera el balance de calor de cuerpos como lagos y estanques, la radiación de energía térmica puede ser un componente importante en el balance de calor.

3.4 La temperatura del suelo

Las rocas y los sedimentos tienen valores altos de capacidad calorífica volumétrica (S_{VC}) pero modestos valores de conductividad térmica (λ). Por lo tanto, tienen valores bastante bajos de difusividad térmica. Los pulsos de calor no se propagan muy rápido o lejos a través del subsuelo de la tierra (al menos, que sea en ausencia de advección de aguas subterráneas).

En verano, la superficie de la tierra se calienta debido a la intensificación de la radiación solar y temperaturas del aire elevadas. Este efecto de calentamiento se propaga unos pocos metros hacia abajo en el subsuelo de la tierra, pero no más allá. De hecho, por debajo de unos 10 m de profundidad, la temperatura del subsuelo es notablemente estable, a un valor que se aproxima al de la temperatura de largo plazo superficial media anual. Como un ejemplo hipotético de condiciones típicas del suelo en Buenos Aires (Iannelli, 2013), a lo largo del curso de un año, la temperatura de la superficie varía alrededor de 20 °C. A 5 m de profundidad, la amplitud de variación de temperatura estacional no es más de 1 °C. De hecho, esta temperatura permanece casi constante durante todo el año y se asimila a la media anual, que en Buenos Aires es de 17,7 °C (1944 a 2010). Esta temperatura está cerca del valor de confort térmico buscado.

En gran parte del Reino Unido, la temperatura media anual de la superficie está en el rango de 9 a 12 °C y la temperatura sub-superficial estable refleja esto. En otras palabras, la temperatura del subsuelo de la tierra es más caliente que la temperatura del aire en invierno, pero más fresco en verano. La tierra proporciona así una fuente conveniente de calor en invierno y una fuente de refrigeración (es decir, un sumidero para “descargar” el calor residual) en verano.

La baja difusividad térmica del subsuelo de la tierra reduce la amplitud de la “señal” de la temperatura anual del aire y también la retrasa en el tiempo. En la ciudad de Junín, provincia de Buenos Aires, la temperatura del aire está sujeta a una rápida fluctuación, alcanzando un mínimo de -4 °C en invierno y las alturas positivamente templadas de + 32 °C en verano (promedios). El agua subterránea casi no muestra señal de variación de temperatura: tiene una constante de 17 a 18 °C, apenas un poco por encima de la temperatura media anual del aire de ≈ 2 °C (Servicio Meteorológico Nacional).

La temperatura del subsuelo poco profundo (por debajo de la zona de fluctuación estacional) varía según la zona climática: en el Reino Unido, es típicamente 9 – 13 °C, en Noruega 4 – 7 °C, y en partes de Rusia, puede estar cerca de 0 °C. En Argentina, en la zona noroeste de la provincia de Buenos Aires, la temperatura está en el orden de los 17 a 18 °C. Generalmente, la temperatura del suelo a pocos metros de profundidad se mantiene similar a la temperatura media anual del aire, con una variación de hasta 2°C.

3.5 Tipos de sistemas geotérmicos

Alta, media y baja entalpía son los sistemas de energía geotérmica clasificados (Figura 7): aquí, el término “entalpía” se relaciona estrechamente con el valor de la temperatura en el sistema. Existe discrepancia entre varios autores acerca de estos límites de clasificaciones, pero son de poco valor práctico. Posiblemente sea mejor clasificar los sistemas geotérmicos en función de su potencial de uso o de las características de los fluidos que producen (Dickson y Fanelli, 2004).

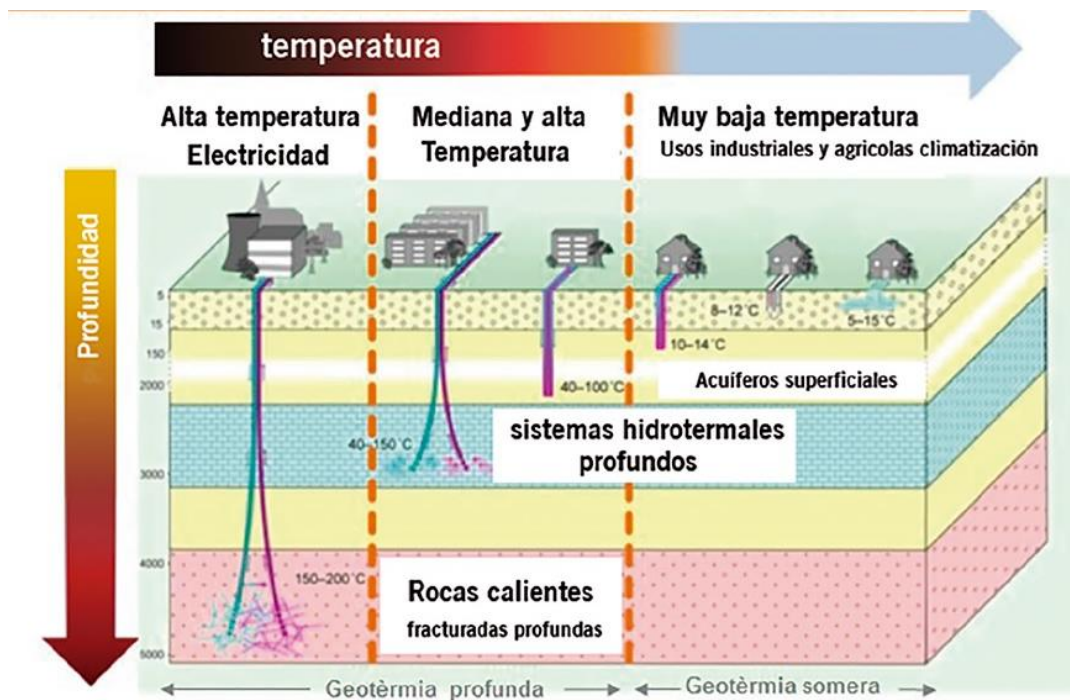


Figura 8. Clasificación de la energía geotérmica según la temperatura (Fuente: Bayerisches Landesamt Für Umwelt, 2016).

3.5.1 Sistemas geotérmicos dominados por agua y vapor

El fluido producido por pozos perforados en sistemas dominados por agua es, principalmente, un líquido como fase de control de la presión, con algo de vapor presente. Bajo las condiciones en el subsuelo de presión, el agua puede manifestarse en diferentes fases según la presión y temperatura a la que se encuentre, como un líquido a temperaturas elevadas, hirviendo cuando la presión es liberada al seguir su tránsito hacia la superficie o al llegar a ella. De esta manera, la producción de agua caliente de estos sistemas es posible, incluso mezclas de vapor y agua, vapor seco o incluso vapor húmedo (ver Figura 8).

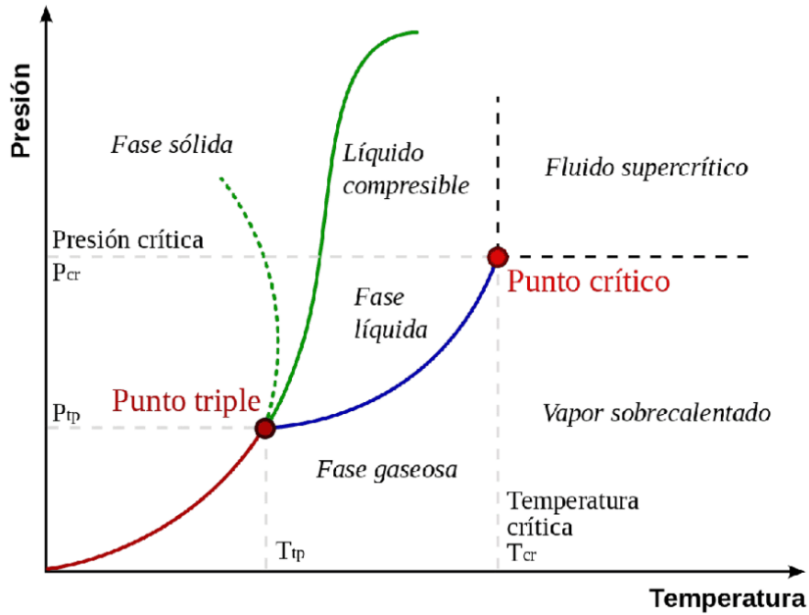


Figura 9. Un diagrama de fase simplificado para el agua, que muestra las fases presentes a varias presiones y condiciones de temperatura. El líquido es la línea (azul) que divide los campos líquido y vapor; el sólido es la línea que divide los campos de hielo y líquido (verde). (Fuente: *Propiedades termodinámicas del vapor por Keenan y Keyes, 2001*).

Los sistemas dominados por vapor son menos comunes. El vapor será la fase de control de la presión, en estos sistemas el vapor y el agua pueden estar presentes dentro de las rocas del yacimiento. Estos sistemas generan, típicamente, vapor sobrecalentado o seco.

3.5.2 Uso directo

Los fluidos geotérmicos de baja temperatura también se pueden usar para usos directos (Lienau, 1998) que incluyen:

- calefacción (edificios);
- industria;
- calentar agua;
- acuicultura y horticultura.

Las bombas de calor pueden ser utilizadas en aplicaciones que proporcionan calefacción mediante estos usos. Generalmente, la transferencia de calor que produce el fluido

geotérmico se hará a través de un intercambiador de calor (ver Figura 10), que hará la transferencia a un segundo circuito llamado fluido de entrega, con control de su composición química. Así, problemas de incrustaciones químicas, o corrosiones estarán limitadas dentro del intercambiador de calor sin afectar el circuito de calefacción restante.

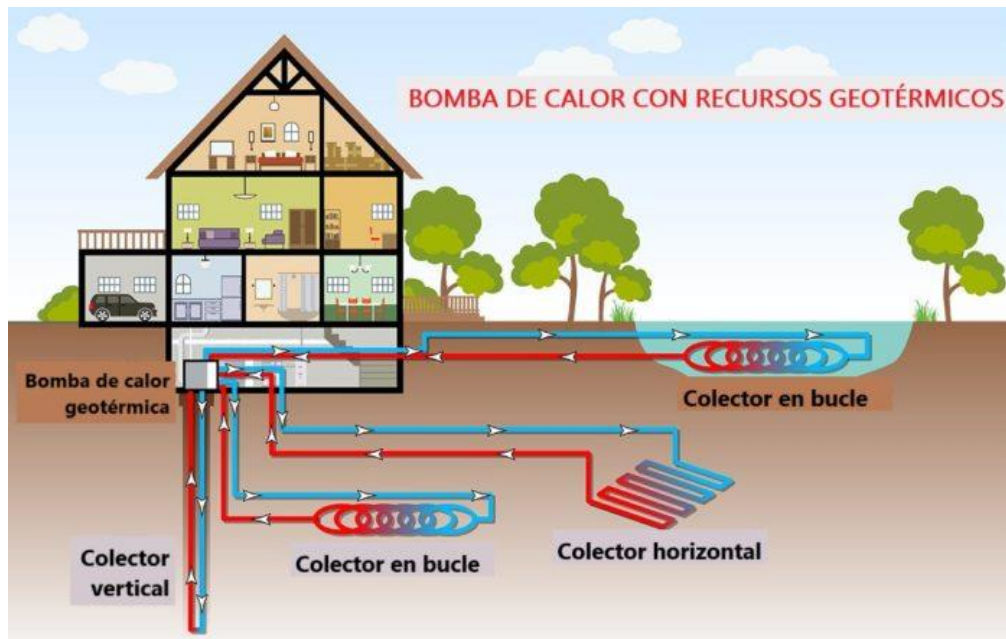


Figura 10. Uso directo de un fluido geotérmico de temperatura más baja para calentar espacios (Fuente: <https://geotermiaonline.com/geotermiaonline/cambio-climatico/>).

Los fluidos geotérmicos de temperatura moderada se pueden utilizar para potenciar la absorción de calor, para proporcionar enfriamiento de espacios o para producir hielo.

3.5.3 Uso en cascada

Por supuesto, en realidad, la energía de muchos sistemas geotérmicos no se extrae solo por un medio de explotación, sino por varias aplicaciones “en cascada” sucesivas. Por ejemplo, los sistemas geotérmicos con entalpías elevadas y de alto flujo de vapor pueden accionar turbinas de vapor de dos etapas: la primera etapa utilizando contenido primario de vapor y la segunda etapa del vapor de agua proveniente del separador para accionar otra etapa de la turbina. Después de esto, en un sistema configurado de cogeneración, se utiliza este calor

residual expulsado de las turbinas que, en vez de mandarlo directamente a un condensador, se utiliza en el calentamiento de aletas para la refrigeración.

3.6 Bombas de calor

Las bombas de calor geotérmicas están entre las más eficientes y confortables tecnologías de calefacción y de refrigeración disponibles, porque usan el calor natural de la tierra para proporcionar calefacción, refrigeración y a menudo, calentamiento de agua.

Si bien muchas partes de la tierra experimentan temperaturas estacionales extremas, mucho calor en el verano a temperaturas bajo cero en el invierno, a unos pocos metros por debajo de la superficie de la tierra, el suelo sigue teniendo una temperatura relativamente constante. La temperatura natural del suelo es más fría que la temperatura natural del aire en verano, y más cálida que la temperatura natural del aire en invierno. Mientras que el margen de variación es pequeño, los cambios estacionales en la temperatura del suelo dan a las bombas de calor geotérmicas una fuente de calor confiable y permanente en invierno y un sumidero de calor de verano.

Las bombas de calor geotérmicas, también conocidas como *geo-exchange*, fuente de agua, acopladas a la tierra, y bombas de calor de energía terrestre, aprovechan este recurso y representan uno de las más eficientes y duraderas opciones en el mercado para calentar y enfriar un hogar.

Muchos sistemas de calefacción, ventilación y sistemas de aire acondicionado utilizan algún tipo de bomba de calor para calefacción y refrigeración.

3.6.1 Funcionamiento de las bombas de calor geotérmicas

Usando un intercambiador de calor (ver Figura 10), una bomba de calor geotérmica puede mover el calor de un espacio a otro. En verano, la bomba de calor geotérmica extrae calor de un edificio y lo transfiere al suelo para enfriar el edificio. En invierno, la bomba de calor geotérmica toma el calor natural del suelo y lo transfiere a la casa o edificio para calefacción.



Figura 11. Los sistemas de bombas de calor geotérmicas, que consisten en el intercambiador de calor (izquierda) (IDEA, 2008) y la bomba de calor (derecha) (Clúster Eficiencia Energética Catalunya, 2019), calientan y enfrían una casa transfiriendo calor hacia y desde la tierra, respectivamente.

La instalación de un sistema de bomba de calor geotérmico puede ser la forma más rentable y la opción más eficiente de calefacción y refrigeración para el hogar de bajo consumo energético. Las bombas de calor geotérmicas son una opción particularmente buena si se está construyendo una nueva casa o planeando una importante renovación de una casa existente.

3.6.2 Bomba de calor geotérmica vs. bombas de calor de fuente de aire

Si bien las bombas de calor geotérmicas funcionan de manera similar a las mucho más comunes bombas de calor de fuente de aire (*Air Source Heat Pump* [ASHP]), las bombas de calor geotérmicas son sustancialmente más energéticamente eficientes que incluso los ASHP

porque aprovechan las relativamente constantes temperaturas del suelo, que es mucho más uniforme que la temperatura del aire. Los sistemas geotérmicos pueden reducir el consumo de energía en aproximadamente 25% a 50% en comparación con los sistemas de bomba de calor de fuente de aire. Las bombas de calor geotérmicas alcanzan altas eficiencias (300%-600%), en las noches más frías de invierno (caloryfrio.com, s.f.).

Al igual que con cualquier bomba de calor, las bombas de calor geotérmicas pueden calentar, enfriar y, si está equipada, abastecer la casa de agua caliente. Algunos modelos de sistemas geotérmicos están disponibles con compresores de dos velocidades y ventiladores variables para mayor comodidad y ahorro de energía. En relación con los ASHP, son más silenciosas, duran más y necesitan poco mantenimiento, y no dependen de la temperatura del aire exterior.

Tipos de bombas de calor geotérmicas

Entre las bombas de calor geotérmicas son cuatro los tipos de sistemas de bucle que enlazan el calor hacia o desde el suelo para un hogar. Tres de estos, horizontal, vertical y estanque/lago son sistemas de circuito cerrado. El cuarto tipo del sistema es la opción de bucle o circuito abierto. Elegir el que mejor se adapte a un sitio en específico, depende del clima, condiciones de suelo, terreno disponible y la ubicación, así como los costos de instalación en el sitio.

Sistemas de circuito cerrado

Horizontal: Este tipo de instalación es generalmente más rentable para instalaciones residenciales, especialmente para una nueva construcción donde hay suficiente espacio disponible. Eso requiere trincheras de al menos de 1 metro de profundidad (Ver Figura 12).

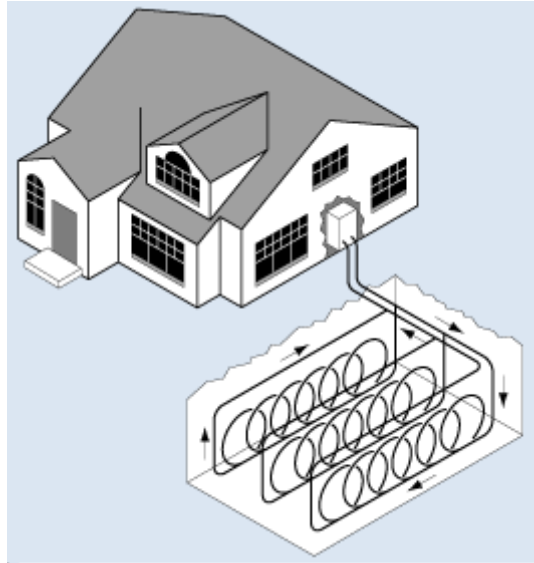


Figura 12. Sistema de circuito cerrado (Horizontal) (www.aires-acondicionados.info)

Vertical: Esto se usa a menudo para sistemas geotérmicos de mayor escala (como en edificios comerciales) donde la tierra es limitada, o donde el suelo es demasiado poco profundo para enterrar tubos horizontales en las trincheras y alguna forma de perforación necesaria en un lecho rocoso. Los sistemas de bucle vertical pueden ser más caros, pero usan menos tierra y también menos perturbación del paisaje existente (Ver Figura 13).

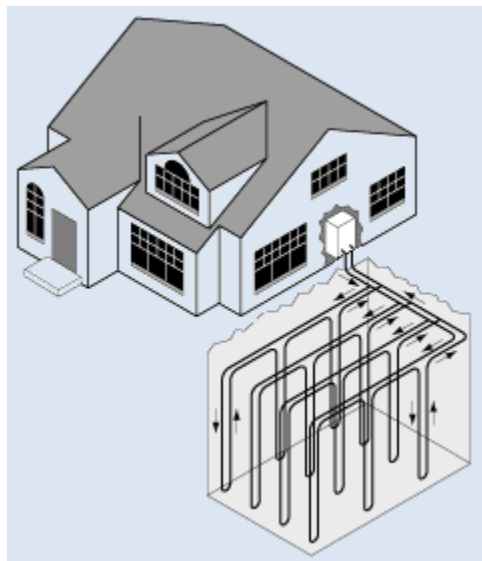


Figura 13. Sistema de circuito cerrado (Vertical). (www.aires-acondicionados.info)

Estanque/Lago: Si el sitio tiene un cuerpo de agua adecuado, esta puede ser la opción menos costosa. El suministro de la de línea de tubería corre bajo tierra desde el edificio al agua y el intercambiador en círculos debe estar al menos dos metros y medio bajo la superficie del agua para evitar la congelación. Las bobinas solo deben colocarse en una fuente de agua que cumpla con los criterios mínimos de volumen, profundidad y calidad (Ver Figura 14).



Figura 14. Sistema de circuito cerrado (Estanque/Lago). (www.aires-acondicionados.info)

Sistema de circuito abierto

Este tipo de sistema utiliza un pozo o un cuerpo de agua como el intercambio de calor del fluido que circula directamente por el sistema de bomba de calor geotérmica. Una vez que ha circulado por el sistema, el agua vuelve a la tierra a través del pozo, el sistema luego se recarga del pozo y continúa el ciclo. Esta opción es práctica sólo con un adecuado suministro de agua relativamente limpia (Ver Figura 15).

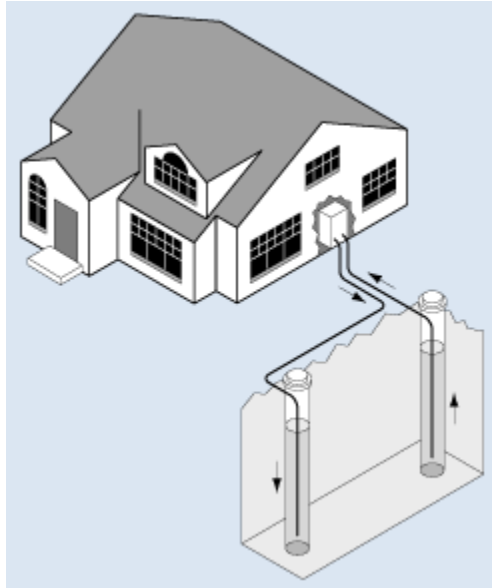


Figura 15. Sistema de circuito abierto. (www.aires-acondicionados.info)

4 Materiales y métodos

4.1 Área de estudio

La región NOBA no posee una delimitación estricta en cuanto a su territorio, pero, para el análisis geotérmico y la disponibilidad del recurso en la zona, podríamos hacer una estimación y una expansión a modo de establecer parámetros cuantificables. El área de estudio según las características del gradiente de temperatura a pocos metros de profundidad, podemos delimitarla como se menciona en la figura 15, en el área marcada en color amarillo. Como puede verse según la gama de colores, las características geotérmicas no poseen grandes variaciones en el área, inclusive, se podría expandir el análisis a toda la provincia de Buenos Aires, Entre Ríos y Santa Fe.

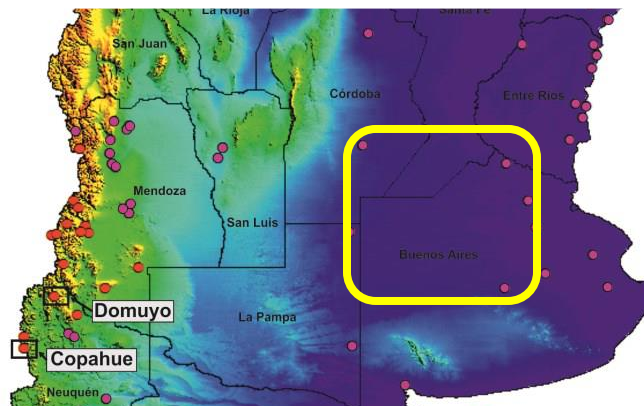


Figura 16. Área de estudio

Las características del terreno en la zona son prácticamente las mismas que se delimitan y conocen como Pampa Húmeda, donde los suelos son oscuros (grises y negros), ricos en materias orgánicas con alguna presencia arcillosa en sectores.

Las temperaturas en esta área, en promedio desde 1944 a 2010 (SMN, 2010), rondan una media anual de 17,7 °C, temperatura cercana a la de confort y con buen principio de aprovechamiento para sistemas geotérmicos someros.

En la figura 17 se muestran las temperaturas promedio en grados centígrados en función de los meses desde el año 1944 al 2010. En el gráfico se pueden observar tres curvas: la de color rojo representa las temperaturas medias, la de color naranja representa las temperaturas máximas medias y la de color verde representa las temperaturas mínimas medias. Por último, se observa una línea recta de 17,7 °C de color violeta que representa la temperatura promedio de todas las temperaturas máximas y mínimas en los diferentes meses desde el año 1944 al 2010 (Iannelli, 2013).

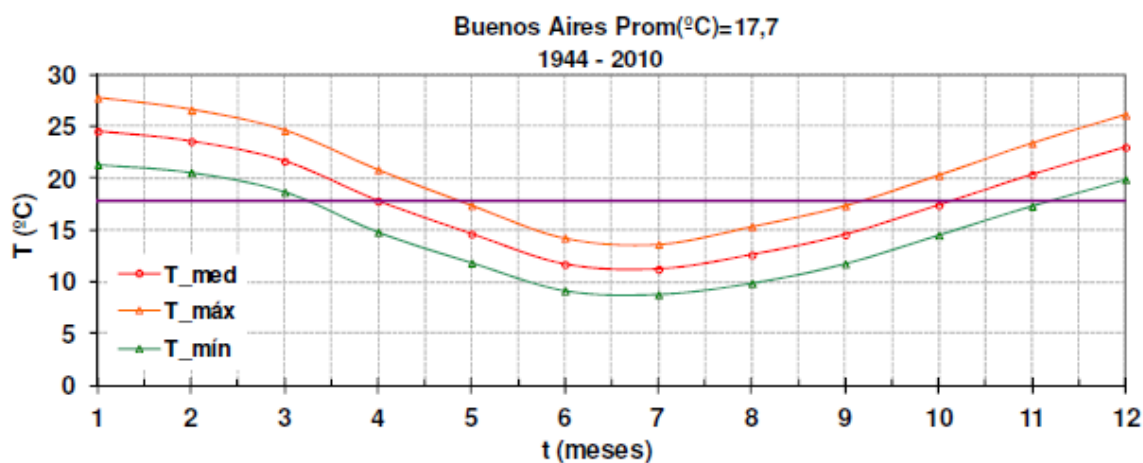


Figura 17. Temperaturas mínimas, medias y máximas en función del tiempo (1944-2010). La curva roja representa la temperatura media mensual y las curvas naranja y verde representan la temperatura máxima y mínima media mensual, respectivamente. La línea horizontal representa la temperatura media anual (Iannelli, 2013)

La Norma IRAM 11.603 (2012), elaborada a partir de estudios realizados por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial INTI, establece seis zonas principales y sus correspondientes sub-zonas, indicando las características climáticas de cada una, sus límites geográficos y recomendaciones de diseño correspondientes a cada región.

Como se observa en la figura 18 la región NOBA corresponde a un clima Templado cálido, dato necesario a la hora de evaluar la eficiencia energética de la vivienda.

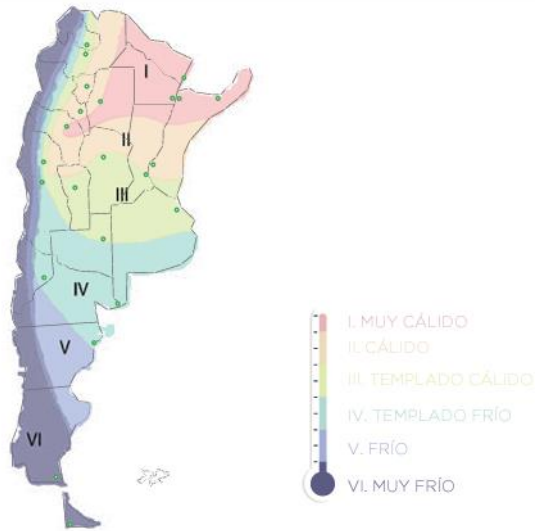


Figura 18. Mapa de clasificación bio-ambiental. (IRAM nº11.603, 2012).

4.2 Análisis térmico de viviendas

La energía para climatizar una vivienda, tanto en invierno como en verano, es un factor clave a la hora de analizar alternativas aplicables. Al igual que sucede con la iluminación o los electrodomésticos, existen edificios más o menos eficientes en el consumo de energía en función de su aislamiento térmico y el uso de energías de origen renovable. El uso de estas energías supone una aislación térmica que acompañe al uso eficiente de las energías. Una vivienda que aplica energías renovables para su calefacción, pero no tiene aislación térmica suficiente como para considerar al sistema eficiente, no entraría dentro de los parámetros establecidos para aplicación, esto es, para aplicar energías alternativas, primero debemos asegurar la eficiencia térmica de las viviendas.

La etiqueta de eficiencia energética de viviendas, es una aplicación argentina que busca brindar información a los usuarios acerca de las prestaciones energéticas de una vivienda y constituya una herramienta de decisión adicional a la hora de realizar una operación inmobiliaria, evaluar un nuevo proyecto o realizar intervenciones en viviendas existentes. (Ministerio de Economía, s.f.)

La Etiqueta de Eficiencia Energética es un documento en el que figura una escala de letras desde la “A” (el mayor nivel de eficiencia energética) hasta la “G” (el menor nivel de eficiencia energética), que determina la clase de eficiencia energética de una vivienda, asociada a un rango de valores del Índice de Prestaciones Energéticas, determinado conforme Norma IRAM 11.900 / 2017.

La Etiqueta estará determinada por aspectos relacionados al diseño arquitectónico de la vivienda, orientación, protecciones solares, los sistemas constructivos utilizados, la calidad y estado de las aberturas, las infiltraciones de aire, los sistemas de calefacción, refrigeración, calentamiento de agua e iluminación instalados, y las eventuales instalaciones de energías renovables. (Ministerio de Economía, s.f.)

El aspecto principal de la eficiencia energética de una vivienda es el consumo de energía, se expresa en kWh/m²año, es decir, energía necesaria (kWh) para mantener la vivienda en condiciones de confort durante un año y por metro cuadrado. Es el valor de mayor utilidad para el usuario y proyectista, ya que informa directamente sobre si climatizar la vivienda requerirá una mayor o menor inversión económica. Si bien disponer de instalaciones energéticas más eficientes afecta a esta categoría, lo más determinante es el aislamiento térmico del edificio, dado que un menor aislamiento implica unas pérdidas continuadas de energía. Las viviendas deben consumir menos de 30,3 kWh/m²año para ser categoría A, en cambio, los inmuebles con categoría G superan los 287,5 kWh/m²año, es decir, casi 10 veces más consumo energético (Asociación de ciencias ambientales de España, s.f.)

Para el caso de estudio, en este trabajo se analizará una vivienda tipo de característica social, considerando su superficie, envolvente y materiales típicos según el ministerio de infraestructura de la nación argentina y su Programa de Eficiencia Energética y Energías Renovables en la Vivienda Social Argentina (Ministerio de economía, s.f.)

4.3 Análisis de caso modelo

Para evaluar las características de los sistemas geotérmicos someros para calefacción de viviendas sociales, se toma como modelo una vivienda simple de dos dormitorios como se muestra en la figura 19

Para evaluar el requerimiento energético de esta vivienda, se supone ubicada en la ciudad de Junín, dentro del área de estudio.

Los materiales utilizados son convencionales de construcción en la zona, siendo paredes de mampostería compuesta por ladrillos huecos y revoque, techos de chapa con aislación y ventanas de doble vidriado hermético para mayor eficiencia energética.

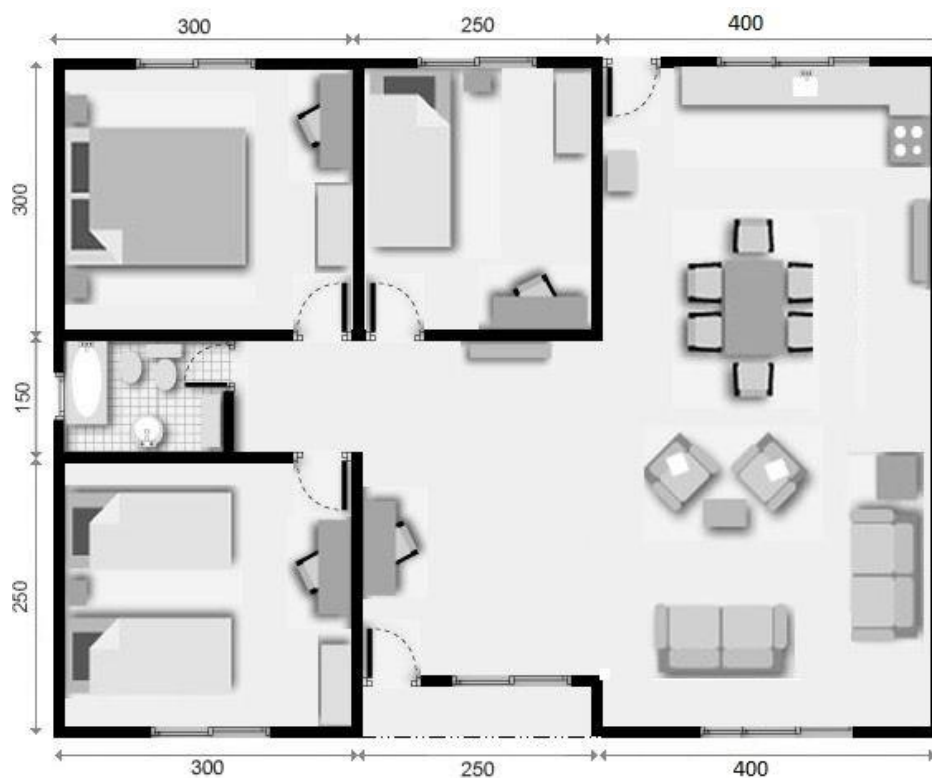


Figura 19. Esquema de vivienda social. (Fuente: Autor)

La evaluación de la capacidad térmica de la vivienda se realiza mediante el método de razón de pérdida de calor mediante el análisis de la resistencia de la construcción a través de la evaluación de convección, radiación y conducción del calor para un día de invierno donde la temperatura exterior es de 3 °C y la interior deseada de 23 °C.

El esquema para las paredes es el que se muestra en la figura 20, donde se evalúan cinco estados de transferencia de calor: convección del aire externo, conducción del revoque exterior, conducción del ladrillo hueco, conducción del revoque interior y convección del aire interior.

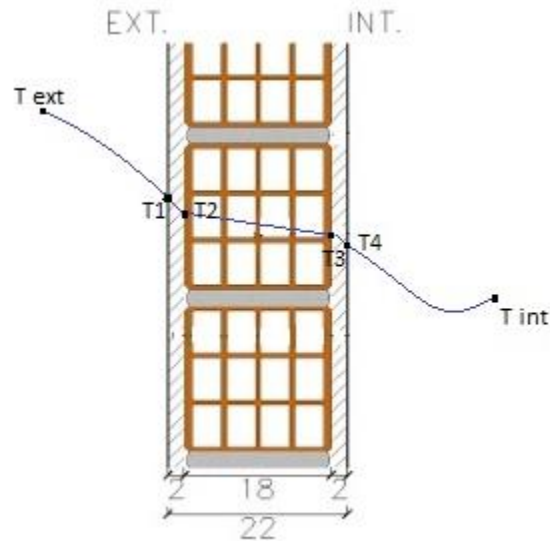


Figura 20. Esquema de análisis térmico de paredes (Fuente: Autor)

La resistencia térmica por conducción es:

$$R_{cond} = \frac{L}{K * A}$$

Siendo R_{cond} la resistencia térmica a la conducción; L el espesor de la pared o material a evaluar; K el coeficiente de conductividad térmica que depende de cada material y A el área expuesta.

La resistencia térmica por convección es:

$$R_{conv} = \frac{1}{h * A_s}$$

Siendo R_{conv} la resistencia térmica a la conducción; h el coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2 \cdot K$) y A el área expuesta (m^2).

Teniendo estas consideraciones, se observa el cálculo para la vivienda modelo:

PERDIDAS POR PAREDES								
Habitación	Sup. (m2)	Altura techo	Volumen (m3)	L (m)	T ext (°C)	T int (°C)	sup exp ext (m2)	Q (W)
Dormitorio 1	9	2,8	25,2	0,18	3	23	16,8	562,34
Dormitorio 2	7,5	2,8	21	0,18	3	23	7	234,31
Dormitorio 3	7,5	2,8	21	0,18	3	23	15,4	717,40
Baño	4	2,8	11,2	0,18	3	23	4,2	140,59
Cocina comedor	40	2,8	112	0,18	3	23	49	1640,17
TOTAL	68		190,4					3294,80

PERDIDAS POR TECHO							
Habitación	Sup (m2)	K para techos	L (m)	T ext (°C)	T int (°C)	R cond	Q (W)
Casa	66,5	0,5	0,2	3	23	0,006015038	3325

PERDIDA POR PISO (SIN AISLACIÓN)							
Habitación	Sup (m2)	K para piso	L (m)	T ext (°C)	T int (°C)	R cond	Q (W)
Casa	66,5	1,08	0,12	15	23	0,001670844	4788

PERDIDA TOTAL (RAZÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR)		
Total	11408	W
Total por m2	167,76	W/m2

Figura 21. Análisis térmico de vivienda

Como se observa de los resultados, una vivienda familiar de 68 m² con construcción convencional de la región, requiere unos 11.400 W térmicos para calefaccionar la casa en condiciones de invierno. Considerando que la temperatura varía en la región alcanzando máximas de 12°C (al menos), este valor varía según la hora y el día. Si se modifica el valor de la temperatura exterior a 12 °C, entonces la capacidad térmica se modifica a 8420 W. Para el análisis consideraremos la necesidad térmica como un promedio de estos valores, sabiendo que pueden existir variaciones según los hábitos y costumbres familiares. El valor adoptado será de 9500 W térmicos.

4.4 Selección de la bomba de calor

Las bombas de calor se pueden utilizar con éxito como única fuente de calor en una instalación, incluso en las condiciones climáticas muy frías o calurosas. Un buen dimensionamiento de la unidad y elección consciente del punto bivalente es crucial para obtener buenos rendimientos estacionales. A menudo se analiza el problema del subdimensionamiento de las bombas de calor. Sin embargo, igualmente importante pero pasado por alto en la discusión es el problema de sobredimensionar la unidad y su funcionamiento en condiciones de carga parcial. Las consecuencias del trabajo bajo carga parcial dependen del sistema de regulación del dispositivo utilizado y del tipo de sistema de calefacción. Muchos dispositivos ajustan la energía generada por el encendido y apagado cíclico (control de encendido/apagado) de sistemas. Este tipo de regulación puede provocar un trabajo inestable de una bomba de calor en condiciones dinámicas. Esto es particularmente visible en el caso de una gran desproporción entre la temperatura de carga del edificio y la capacidad máxima de la bomba de calor. En otoño y primavera, la demanda de calor del edificio suele ser pequeña. Al mismo tiempo, la capacidad de la bomba de calor es alta. Cuanto mayor es la desproporción, más cortos son los ciclos del compresor y, por tanto, mayor será el número de ciclos de encendido y apagado. En consecuencia, existe una degradación significativa de la eficiencia energética. Para reducir las pérdidas de eficiencia causadas por el ciclo corto, se utiliza normalmente un convertidor de frecuencia, que regula la capacidad del cambio de la velocidad de rotación del compresor. Este tipo de regulación afecta al COP conseguido por la bomba de calor y es limitado a la reducción de potencia máxima (normalmente aprox. 30% de la potencia nominal). Eso también reduce el rango de la regulación de encendido/apagado, pero no lo elimina por completo. Con la potencia mínima (máximamente reducida), este tipo de regulación también ocurrirá en dispositivos equipados con un convertidor de frecuencia.

Las bombas de calor que extraen calor a baja temperatura del subsuelo son comunes en muchos países, son apropiadamente llamadas bombas de calor de fuentes geotérmicas (GHP). La gran mayoría de fuentes de las bombas de calor actualmente en servicio están configuradas para entregar calor a mayor temperatura a través de un sistema de distribución de aire forzado dentro del edificio. Esto lleva a la clasificación más específica de bomba de

calor.

Las bombas de calor que extraen calor a baja temperatura de fuentes geotérmicas como lagos, estanques, pozos o tuberías enterradas en la tierra usan agua o una solución anticongelante para transportar el calor de esas fuentes a la bomba de calor. Estas, por lo tanto, se clasifican como bombas de calor de fuente de agua. Las bombas de calor de fuentes de agua que entregan calor a través de un sistema de aire forzado se denominan más específicamente calor de “agua-aire”. Los que entregan calor mediante a una distribución hídrica se conocen como bombas de calor “agua a agua”.

El principio de funcionamiento de la bomba es utilizar una fuente de energía para extraer el calor geotérmico. El sistema consta de un circuito cerrado o abierto que contiene un refrigerante. Se crea un ciclo termodinámico a través de evaporación, condensación, compresión y expansión. Una bomba de calor “bombea” calor de un nivel de baja a alta temperatura. El calor generado se transfiere a la distribución de agua (suelo radiante, radiadores de baja temperatura y/o ventiladores) en la instalación a través de un intercambiador de calor.

Según el modelo y las condiciones, una bomba de calor geotérmica, por ejemplo, entrega entre 3 y 5 kWh de calor utilizable por cada kWh de electricidad que consume. Así esto significa que aproximadamente $2/3$ a $4/5$ del calor requerido es “gratuito”.

La necesidad de calefacción será mayor en el día más frío del año y viceversa. La demanda de calentamiento máximo es, en regiones frías, sólo necesaria para unas pocas semanas por año. Seleccionar una bomba de calor que cubra toda la demanda de calefacción no es la solución más económica. En eso caso, la bomba de calor sería demasiado grande y los costos de inversión serían altos.

Una solución a esto resulta en un mejor equilibrio entre el costo de inversión y costo de consumo. En tal caso, la bomba de calor proporciona la mayor parte de las demandas de calefacción, pero, en clima extremadamente frío, es apoyado por un calentador de respaldo

eléctrico. El calentador de respaldo es sólo utilizado a temperaturas por debajo del punto de equilibrio. La Figura 22 muestra un esquemático de una bomba de calor.

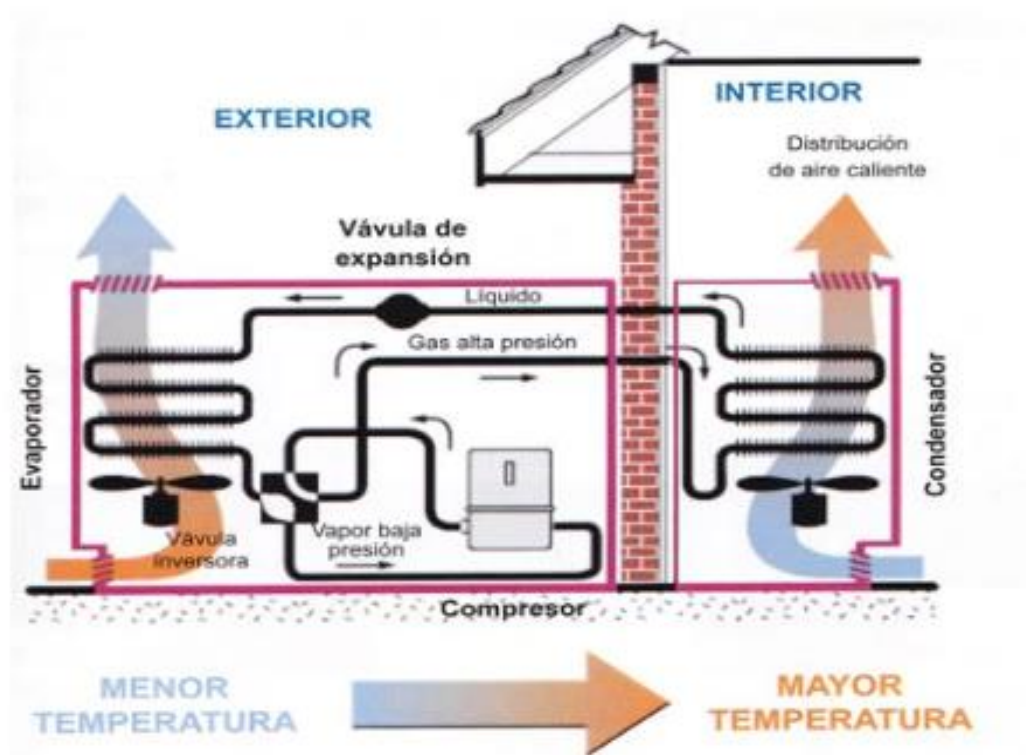


Figura 22. Esquemático de una bomba de calor. (www.caloryfrio.com)

Al operar en modo calefacción, estas unidades absorben el calor del subsuelo, concentran ese calor para aumentar su temperatura, y transferirlo a una corriente de agua o una solución anticongelante. El agua calentada se puede utilizar para una amplia variedad de cargas tales como calefacción de espacios hídricos, calentamiento de agua doméstica o climatización de piscinas. Las bombas de calor también se pueden invertir para extraer calor de una corriente interior de agua y disiparlo al aire exterior. Como tal, se pueden utilizar para suministrar varios tipos de distribución de refrigeración por sistemas de agua enfriadas. Las modernas bombas de calor proporcionan una combinación ideal de bajo rendimiento térmico ambiental junto con gran confort y eficiencia energética que ofrece la tecnología hídrica.

Se muestra un ejemplo de una bomba de calor moderna en la Figura 23.

El resto de este proyecto discutirá los detalles de aplicación de modernas bombas de calor en la aplicación para calefacción y refrigeración.



Figura 23. Ejemplo de bomba de calor moderna. (www.ciatema.com.ar)

Es importante notar que la capacidad de calefacción necesaria para la bomba de calor que se está calculando debe ser de escala mayor por el impacto de las cargas térmicas calculadas en las secciones anteriores, que pueden ser altas.

El coeficiente de rendimiento (COP) de una bomba de calor es un número que indica la proporción del calor beneficioso de salida de la bomba de calor, dividida por la potencia eléctrica entrada requerida para operar la bomba de calor. Cuanto mayor sea el COP, mayor es su tasa de producción de calor por unidad de electricidad de potencia de entrada.

La fórmula muestra esta relación en forma matemática. El factor 3,413 de esta relación convierte los vatios en Kcal/h. Esto hace que COP sea un número sin unidades.

$$COP = \frac{\text{Calor de salida } \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}\right)}{\text{Entrada eléctrica (Watt)} \times 3,413}$$

El COP también se puede visualizar como la relación de la producción de calor dividida por la entrada de energía eléctrica, como se muestra en la Figura 24.

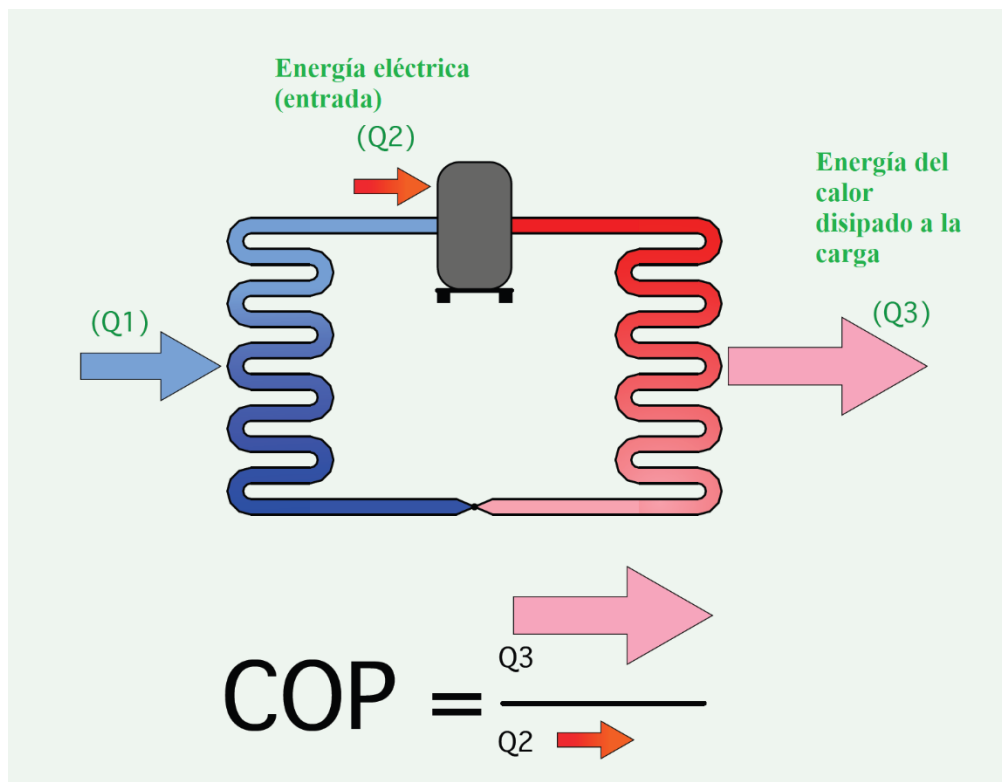


Figura 24. Fórmula para el cálculo del COP (Fuente: Autor)

Relación de eficiencia energética

La forma común de expresar la eficiencia de enfriamiento instantáneo de una bomba de calor se llama Razón de Eficiencia Energética (EER), que se puede calcular utilizando la Fórmula.

$$ERR = \frac{Q_c}{Q_e} = \frac{\text{capacidad de enfriamiento } \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}\right)}{\text{Entrada eléctrica (W)}}$$

Donde:

EER = Razón de Eficiencia Energética

Q_c = capacidad de enfriamiento (Kcal/h)

Q_e = entrada de energía eléctrica a la bomba de calor (W)

Cuanto mayor sea el EER de una bomba de calor, menor será la potencia eléctrica necesaria para producir una determinada velocidad (o razón) de enfriamiento.

Al igual que el COP, la EER de una bomba de calor depende de la fuente y la temperatura del sumidero. Cuanto más cercana es la temperatura de la fuente con la de sumidero, mayor será la EER de la bomba de calor. Por este motivo, las bombas de calor geotérmicas tienen esa ventaja sobre las aerotérmicas, la fuente geotérmica de baja entalpía mantiene una temperatura constante durante todo el año (18°C para noroeste bonaerense) y muy cercana a la temperatura de confort (20°C); mientras que las bombas aerotérmicas dependerán de la temperatura ambiente estacional, llegando a 0°C en invierno y 36°C en verano.

El REE también está ligeramente influenciado por los caudales. Mayores caudales, ya sea de la fuente o del sumidero, producen aumentos en la EER. Este es el resultado del aumento de la convección en los intercambiadores de calor del lado del aire y del lado agua.

4.5 Estimaciones de costos

Para evaluar los costos de instalación de un sistema geotérmico en barrios residenciales se hará énfasis de dos casos particulares actuales en argentina, los cuales tienen aplicaciones similares y sus datos de costos geotérmicos son conocidos. A estos datos se le sumará el

aporte de CIATEMA, una empresa Nacional que está comercializando bombas de calor geotérmicas pero que al día no realiza la obra civil, la cual abarca gran parte del presupuesto.

El primer caso a analizar es el Barrio el Maitén de Bariloche, donde se instaló un sistema geotérmico horizontal, en una fosa de 20 metros de largo y 5 metros de ancho, a unos 2 metros de profundidad (FOVISEE, 2016).



Figura 25. Esquema de instalación de sondas geotérmicas (FOVISEE, 2016)

El barrio consta de cuatro casas, las cuales cuentan con sistema de tuberías horizontales en las cuales no se utilizan bombas de calor, sino que el aire es forzado por un ventilador a pasar por debajo de la tierra, donde a través de cañerías especiales (importadas de Alemania), toman una temperatura mayor que es constante como ya se mencionó, y se fuerza (por otros cuatro ventiladores individuales para las viviendas) a ingresar a los hogares. Las mediciones realizadas en el lugar, que se muestran en las figuras 26 y 27, detallan que se está cerca de una temperatura de confort con solo encender una perilla que da alimentación a un ventilador para forzar la entrada de aire.

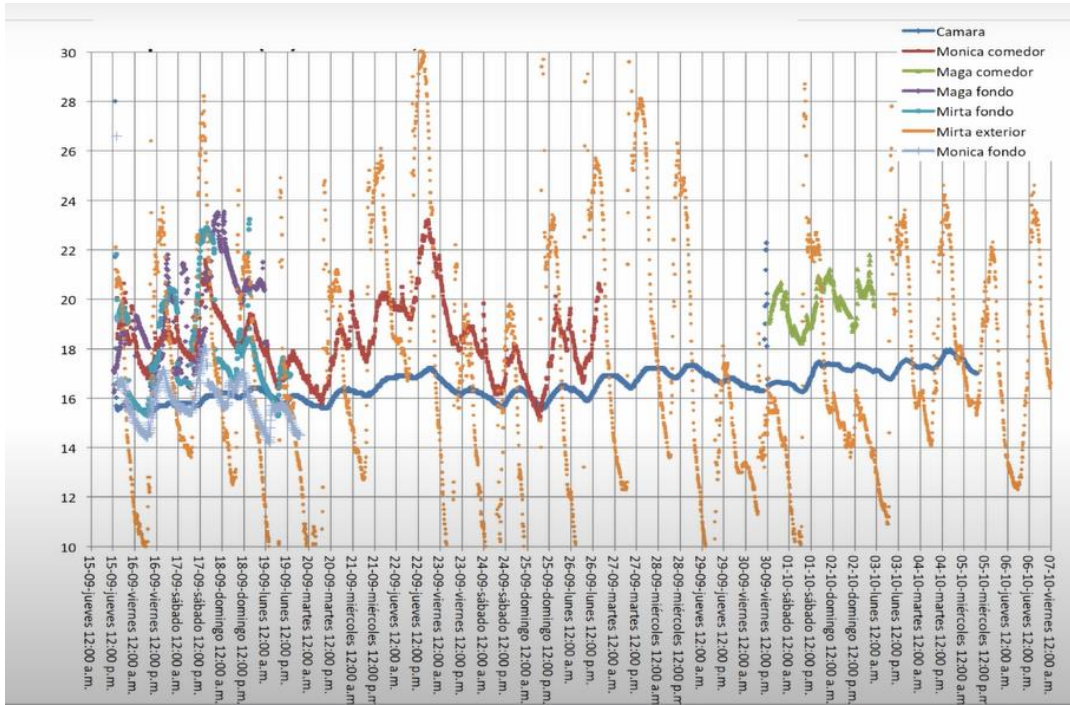


Figura 26. Datos obtenidos de temperaturas interiores (FOVISEE, 2016)

Zona de temperatura de confort

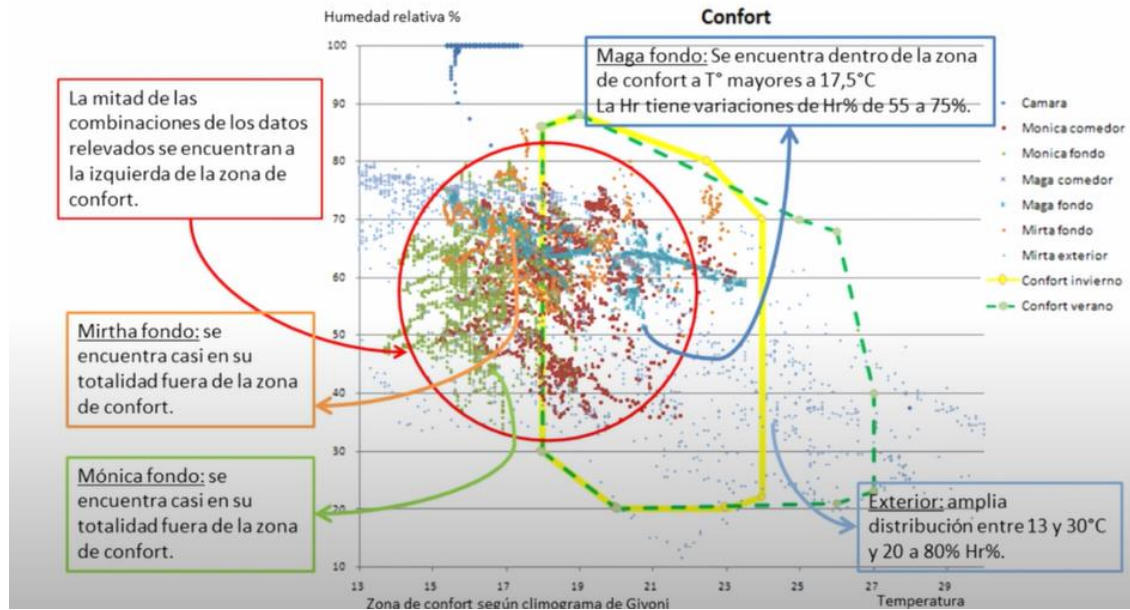


Figura 27. Datos de temperaturas interiores (FOVISEE, 2016)

En cuanto a costos, este sistema instaló la totalidad de calefacción y refrigeración por U\$S1.450.- por vivienda (FOVISEE, 2016). Hay que considerar que solo fueron cuatro unidades y que no requieren bombas de calor y todo el sistema de distribución que las GHP necesitan.

El segundo caso de análisis tiene otras dimensiones, es el proyecto *Chateau Harmonie*, ubicado en Córdoba. Cuenta con 266 unidades de departamentos que contarán (aún sigue en construcción) con calefacción geotérmica.

En este caso, cada torre habilitará en el subsuelo un sistema de provisión, consistente en la instalación de bombas de calor, desde las cuales bajan sondas a 50 metros de profundidad para la búsqueda de temperatura (Canter, 2018).

El costo de instalación de las sondas y bombas de calor fue de U\$S1.380.000.- lo cual, dividido entre las 266 unidades, queda en un aproximado de U\$S 5.187.- por departamento. Si se considera el valor de venta o construcción de una unidad sustentable y con *amenities*, este valor no es de una proporción no aceptable.

Ahora bien, si ese valor lo traducimos a un barrio residencial de unas 40 viviendas, el número ya deja de ser cautivador. El costo sería de aproximadamente U\$S 20.000 a U\$S 35.000 por vivienda. Considerando el valor de edificación de una vivienda social, este importe no es rentable desde el punto de vista económico y de retorno de inversión.

5 Resultados y discusiones

5.1 Viabilidad de la aplicación para la zona noroeste de Buenos Aires, Argentina, NOBA

Considerando los antecedentes y las investigaciones realizadas, podemos hacer aproximaciones para la vivienda modelo analizada anteriormente, la cual requiere 9.500 W térmicos para acondicionar el ambiente, que son aproximadamente 8.170 Kcal/h.

Una bomba de calor para este requerimiento, hoy tiene un valor aproximado entre U\$S 9.000 y U\$S 12.000 en Junín y alrededores, según la empresa Nuevos Ayres. A estos valores se le suman los costos de instalación de los *fan coils*, piso radiante o radiadores, más la instalación de las sondas geotérmicas.

Las sondas geotérmicas, suponiendo instalación horizontal en un pozo de 15 m x 2 m x 2 m (largo, ancho y profundidad respectivamente), puede llevar unas 20 horas de máquina, a un costo aproximado de 130 U\$S por hora, lo cual suma unos U\$S 2.600.- por lo que el total, considerando bomba + obra civil + cañerías y accesorios, puede rondar los U\$S 15.000 a U\$S 25.000.-

Aunque técnicamente es factible la aplicación de las bombas de calor en la región mencionada, desafortunadamente la viabilidad financiera o económica puede resultar poco factible debido a que el costo de aplicación de esta tecnología es considerablemente elevado. Resumiendo, los datos estimados y analizados, la instalación de una nueva bomba de calor geotérmica cuesta entre los U\$S 12.000 y los U\$S 45.000. Los precios entre U\$S 20.000 y U\$S 30.000 son los más generalizados. Aquellos con propiedades más grandes pueden suponer pagar un aproximado de U\$S 30.000 a U\$S 45.000.

Las bombas de calor geotérmicas pueden costar entre U\$S 10.000 y U\$S 15.000. Este rango de costos es el costo de instalación de un sistema GHP completo de entre 1 y 5 toneladas (3.000 a 15.000 Kcal/hora).

Los GHP son mucho más caros que otros sistemas (*Heating Ventilation Air Coindition* [HVAC]) por una simple razón: el arduo trabajo requerido para instalar la infraestructura

subterránea. La perforación, excavación de zanjas e instalación de GHP generalmente representan dos tercios de los costos totales.

Muchos consumidores se sorprenden por la amplia gama de precios de las GHP. La razón es que hay muchos factores que determinan el costo de los GHP; los analizamos a continuación.

Factores de costo de la bomba de calor geotérmica:

Tamaño de la casa: cuanto más grande sea la casa, más equipo se requerirá, tanto sobre el suelo como bajo tierra. Las casas más grandes tienden a tener costos en el rango de los U\$S 30.000 a los U\$S45.000.

Condiciones del suelo: será necesario evaluar la conductividad térmica del suelo y la idoneidad para la perforación del suelo debajo de una casa. El primero se refiere a la capacidad del suelo para intercambiar calor: cuanto mayor sea, menor será el tamaño del bucle requerido. Mientras tanto, la densidad y el contenido de roca del suelo determinarán qué tan difícil será perforar, lo que, nuevamente, puede influir en los costos de instalación.

Niveles de aislamiento del hogar: los hogares que aprovechan la calefacción pasiva o están bien aislados pueden usar sistemas GHP más pequeños, lo que reduce los costos.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, elaboró un Plan de Acción Nacional de Energía y Cambio Climático. Versión I - 2017. Para promover las bombas de calor. La medida considera el reemplazo de estufas de tiro balanceado por equipos de aire acondicionado frío-calor (bombas de calor). El objetivo adicional que se plantea para esta medida es una penetración del 90 % de bombas de calor para el 2030.

Necesidades y barreras

- Falta de información al usuario respecto del uso de distintos tipos de tecnologías

para la calefacción en el sector residencial, de los ahorros derivados de la eficiencia energética y de las costumbres a modificar.

- Relación de costo de energía eléctrica y combustibles (principalmente gas natural) y diferencia del precio para el recambio tecnológico en los casos en los que ya se encuentra instalado un sistema de tiro balanceado.
 - Falta de información respecto de las ventas para establecer políticas efectivas.
- Instrumentos y herramientas de implementación
- Proyecto de Ley de Eficiencia Energética: establecería el marco para conjugar distintas actividades como el etiquetado, el establecimiento de estándares mínimos, las campañas de difusión y educación, y la promoción de políticas de recambio de tecnología, entre otras.
 - Norma IRAM 62.406 (equipos de aire acondicionado).
 - Norma NAG-315 (calefactores).

Para su financiamiento, se requieren fondos orientados a proyectos de eficiencia energética, tanto para el desarrollo de políticas como para la implementación, y para reforzar y ampliar la investigación, el desarrollo, la capacitación y la difusión en la temática.

5.2 Beneficios de la bomba de calor geotérmica

Funciona en todos los climas: dado que la bomba de calor geotérmica se basa en las temperaturas subterráneas constantes durante todo el año, es capaz de operar de manera eficiente incluso en condiciones extremas de frío y calor. (Las bombas de calor de fuente de aire, por el contrario, se vuelven menos eficientes para enfriar cuando las temperaturas son muy altas y menos eficientes para calentar cuando las temperaturas son muy bajas).

Larga vida: las bombas de calor geotérmicas son únicas debido a su vida útil extremadamente larga. Se puede esperar que la infraestructura subterránea dure cómodamente 50 años. El equipo sobre el suelo (la bomba de calor y el intercambiador) deberá reemplazarse antes, probablemente después de dos décadas más o menos.

Altamente eficiente: los GSPH tienen un coeficiente de rendimiento entre 3 y 5. Esto es más eficiente que cualquier otro tipo de sistema de calefacción o refrigeración y existen marcas que aseguran que son un 45 % más eficientes que los HVAC tradicionales.

Bajos costos operativos: debido a la eficiencia operativa mencionada anteriormente, los sistemas de bombas de calor geotérmicas requieren muy poca electricidad para funcionar y, por lo tanto, reducen sustancialmente las facturas de energía.

Período de recuperación rápido: gracias a los ahorros en las facturas de servicios públicos, los GHP tienen un período de recuperación de 2 a 10 años, según Energy.gov y la empresa argentina CIATEMA.

Respetuoso con el medio ambiente: las bombas de calor geotérmicas no queman combustible durante su funcionamiento. Requieren relativamente poca electricidad: se puede obtener su energía de fuentes limpias, entonces un GSHP puede operar con cero emisiones.

5.3 Economía de las bombas de calor geotérmicas

Aunque el costo de compra e instalación de un sistema GHP residencial suele ser más alto que el de otros sistemas de calefacción y refrigeración, los GHP instalados y del tamaño adecuado proporcionan más energía por unidad consumida que los sistemas convencionales. Para obtener más ahorros, los GHP equipados con un dispositivo llamado “desrecalentador” que pueden calentar el agua del hogar. En el período de enfriamiento de verano, el calor extraído de la casa se utiliza para calentar el agua de forma gratuita. En el invierno, los costos de calentamiento de agua se reducen en aproximadamente un 50%.

Dependiendo de factores como el clima, las condiciones del suelo, las características del sistema que se elija y el financiamiento e incentivos disponibles, se puede recuperar la inversión inicial en unos pocos años. Y, cuando se incluye en una hipoteca, la inversión en un GHP puede producir un flujo de caja positivo desde el principio.

5.4 Evaluación del sitio para una bomba de calor geotérmica

Las temperaturas del suelo poco profundo son relativamente constantes en Argentina, por lo que las bombas de calor geotérmicas (GHP) se pueden usar de manera efectiva en casi cualquier lugar. Sin embargo, las características geológicas, hidrológicas y espaciales específicas del terreno ayudarán al proveedor/instalador del sistema local a determinar el mejor tipo de bucle de tierra para el sitio.

5.4.1 Geología

Factores como la composición y las propiedades del suelo y roca (que pueden afectar las tasas de transferencia de calor) requieren consideración al diseñar un circuito de tierra. Por ejemplo, un suelo con buenas propiedades de transferencia de calor requiere menos tubería para recolectar cierta cantidad de calor que un suelo con malas propiedades de transferencia de calor. La cantidad de suelo disponible también contribuye al diseño del sistema: los proveedores de sistemas en áreas con rocas duras extensas o suelos demasiado poco profundos para abrir zanjas pueden instalar bucles de tierra verticales en lugar de bucles horizontales.

5.4.2 Hidrología

La disponibilidad de agua subterránea o superficial también juega un papel en la decisión de qué tipo de circuito de tierra usar. Según factores como la profundidad, el volumen y la calidad de agua, las masas de agua superficial se pueden utilizar como fuente de agua para un sistema de circuito abierto o como depósito para bobinas de tuberías en un sistema de circuito cerrado. El agua subterránea también se puede utilizar como fuente para sistemas de circuito abierto, siempre que la calidad del agua sea adecuada.

Antes de comprar un sistema de circuito abierto, se debe asegurar de que el proveedor/instalador del sistema haya investigado completamente los problemas hidrológicos del sitio, para que pueda evitar el agotamiento potencial del acuífero y la

contaminación del agua subterránea. Los fluidos anticongelantes que circulan a través de sistemas de circuito cerrado generalmente presentan poco o ningún riesgo ambiental.

5.4.3 Disponibilidad de terreno

El tamaño de la superficie y el diseño del terreno, paisajismo y la ubicación de los servicios públicos subterráneos o los sistemas de rociadores también contribuyen al diseño del sistema. Los bucles de tierra horizontales (generalmente los más económicos) se utilizan normalmente para edificios de construcción nueva con suficiente terreno. Las instalaciones verticales o las instalaciones horizontales más compactas se utilizan a menudo para edificios existentes porque minimizan la perturbación del paisaje.

5.5 Instalación de bombas de calor geotérmicas

Se necesitan conocimientos técnicos y equipos especializados para instalar correctamente las tuberías, por lo que la instalación de un sistema GHP no es un proyecto de bricolaje. Siempre se puede encontrar un instalador calificado, aunque a la fecha, diciembre de 2022, sólo existen unas tres a cuatro empresas en toda Argentina que está incursionando en tema.

El intercambiador de calor del suelo en un sistema GHP se compone de un sistema de tuberías de bucle cerrado o abierto. El más común es el circuito cerrado, en el que la tubería de polietileno de alta densidad se entierra horizontalmente a una profundidad de 1 a 2 m o verticalmente a una profundidad de 30 a 120 m. Estas tuberías se llenan con una solución anticongelante/agua respetuosa con el medio ambiente que actúa como intercambiador de calor. Como ya ha sido mencionado, en invierno, el fluido de las tuberías extrae el calor de la tierra y lo lleva al interior del edificio. En el verano, el sistema se invierte y toma el calor del edificio y lo deposita en el suelo más fresco.

Los ductos en el hogar distribuyen el aire calentado o enfriado a través de la casa, al igual que los sistemas convencionales. La caja que contiene el serpentín interior y el ventilador a veces se denomina manejador de aire porque mueve el aire de la casa a través de la bomba

de calor para calentar o enfriar. El controlador de aire contiene un ventilador grande y un filtro al igual que los acondicionadores de aire convencionales.

5.6 Barreras o inconvenientes del sistema

Si se habla de una aplicación para una comunidad con numerosas instalaciones incluidas en el proyecto, se deben considerar los inconvenientes que puede acarrear este tipo de tecnología.

5.6.1 Costos de capital (barrera del mercado)

La barrera de mercado más reconocible para los sistemas de bombas de calor geotérmicas siempre ha sido los costos iniciales. Los costos de capital para la instalación de un sistema de bomba de calor geotérmica a escala de una comunidad serán bastante significativos, y podría resultar en la terminación de un proyecto si el tipo correcto de financiación no está disponible. Una opción sería la utilidad local que los proveedores podrían financiar la construcción del sistema comunitario, creando una utilidad geotérmica. Esto permitiría que las residencias experimenten reducciones en sus facturas mensuales de servicios públicos mientras las empresas de servicios públicos administran el uso de energía del lado de la demanda y cobran tarifas por el uso del sistema.

5.6.2 Disruptivo (barrera del mercado)

Para proyectos de modernización comunitaria, la instalación del intercambiador de calor subterráneo podría afectar a la rutina de una comunidad. La perforación es un proceso muy ruidoso y desordenado, y el tiempo de vida proyectado para un proyecto podría ser de años si el sistema que se está instalando es considerable. Este podría llegar a ser un elemento disuasorio para la comunidad. Este tipo de sistemas no se considera apropiado para instalaciones ya construidas, sino que se piensa para nuevos proyectos de viviendas

5.6.3 Proximidad (Barrera del mercado)

Los GHP a escala comunitaria requerirán una cantidad de tuberías para conectar todos los edificios y casas que residen dentro de los parámetros comunitarios definidos. Esto dará lugar a complicaciones relacionadas con los costos, las pérdidas parásitas de bombeo y los requisitos de energía y pérdidas térmicas. Las complicaciones debidas a pérdidas térmicas podrían reducir el rendimiento operativo general, y posiblemente excluir algunas estructuras o limitar el tamaño de la comunidad capaz de conectarse al mismo sistema. Además, la excavación de zanjas agregará costos a la instalación del sistema y, si hay una cantidad excesiva de zanjas, esos costos podrían resultar en una situación económicamente desfavorable. Este problema podría resolverse trabajando con los proveedores de servicios públicos locales para hacer una zanja común para todas las conexiones de servicios públicos, lo que permite que los servicios públicos y los que residen en la comunidad para compartir esos costos fijos. Es posible que esta resolución no esté disponible para proyectos de modernización donde la infraestructura de servicios públicos ya está en su lugar. Otro problema puede surgir en la circulación del fluido que trabaja a través del sistema. Con un exceso de tuberías, los requisitos de energía para hacer funcionar las bombas de circulación pueden aumentar significativamente los costos de operación.

5.6.4 Pérdida/acumulación de calor

Con el tiempo, el sistema de bomba de calor geotérmica habrá extraído o acumulado calor energía desde o hacia el suelo, y podría potencialmente causar que la temperatura general del suelo cambie. Esto tendrá un impacto ambiental en el terreno y dará como resultado una menor eficiencia del sistema. Será necesario tener una consideración cuidadosa de este proceso en una comunidad a escala. Sobre la base de un edificio individual, esto generalmente se resuelve aumentando el espacio entre pozos, o implementar una solución de sistema híbrido para equilibrar las cargas. Estas soluciones pueden ser mejoradas y transferidas a un proyecto a nivel comunitario, con el consiguiente aumento en el costo de capital y si las condiciones técnicas del lugar lo permiten.

5.7 *District Heating*, Aplicación a barrios residenciales planificados.

Según las consideraciones anteriores, Argentina y, en particular, la pampa húmeda, si bien tiene los recursos naturales para aprovechar esta tecnología, aún no está capacitada técnicamente para utilizar la energía geotérmica somera (si de barrios residenciales o sociales hablamos). Si consideramos casos particulares, como la posible aplicación en una vivienda familiar modelo, esta tecnología puede ser provechosa por la disponibilidad de algunas empresas que ya están haciendo la instalación y aprovechando la fuente de calor constante, aunque los precios aún no sean tan convenientes, el mercado se encargará de determinar si en algún momento lo será.

Desde el punto de vista de barrios sociales, como se mencionó anteriormente, no es posible aún abastecer con energía geotérmica somera, sino que se necesita perforar bastante la corteza terrestre y llegar a profundidades de 50 a 80 metros.

Para proyectos residenciales privados, con posibilidades de recupero de inversiones, la instalación de este tipo es beneficiosa, como ya se mencionó en el caso *Chateau Harmonie*, Córdoba. El costo de instalación por unidad representa entre un 5% a un 15% del valor de venta del inmueble.

En los países escandinavos o con trayectoria en la temática, las temperaturas en invierno son extremas, por lo que la necesidad tentó a la ingeniería para desarrollar este tipo de tecnologías. Al día de la fecha de este trabajo, esas tecnologías tienen valores muy elevados comparados con los sistemas tradicionales de calefacción y refrigeración ya conocidos. Sumado a esto, las temperaturas de invierno en la zona no son extremas, no se detectan temperaturas por debajo del cero con frecuencia, y cuando lo hacen, sólo es en algunos momentos del día.

Un tipo de instalación que quedará para otro estudio y con posibilidad de desarrollo en esta temática, son los edificios de departamentos, donde existe la posibilidad de instalar las sondas geotérmicas en la fundación del edificio, cuando se está construyendo. Esto permite ahorrar una de las partes más costosas de la instalación, que es la perforación para las sondas.

6 Conclusiones

Los propietarios de viviendas que instalan bombas de calor geotérmicas normalmente verán grandes ahorros en comparación con los calentadores de propano, leña, electricidad o incluso gas natural. Las bombas de calor geotérmicas también son más eficientes que cualquier otro sistema de calefacción y refrigeración y, por lo tanto, ayudan a reducir las facturas de energía y las emisiones de carbono al mismo tiempo.

Sin embargo, hay algunas grandes desventajas a tener en cuenta. La mayor de ellas es el alto costo inicial, que puede desanimar a los propietarios de viviendas con un presupuesto limitado o a aquellos que no prevén quedarse en el mismo lugar por mucho tiempo. Además de eso, debe haber suficiente espacio en la propiedad, tanto para instalar la afinación subterránea como para proporcionar acceso al equipo de montaje necesario. Dados los requisitos de espacio, incluso para los sistemas verticales, es raro ver la geotermia instalada en áreas muy urbanizadas.

Si estas desventajas no son un factor decisivo, es decir, si se tiene el presupuesto y el espacio para instalarlos, entonces definitivamente vale la pena considerar las bombas de calor geotérmicas. Un buen primer paso es mejorar la eficiencia energética de una casa. Esto ayudará a reducir el tamaño del sistema geotérmico requerido, reduciendo los costos.

Por supuesto, para tomar una decisión final, es importante consultar los servicios de profesionales encargados de estos sistemas y presentar una estimación detallada del costo según el tipo de sistema y la instalación que satisfaga las necesidades en particular.

Una vez que se tenga una idea más clara de los costos, es posible que se deseen comparar cifras con una bomba de calor de fuente de aire, que es un poco menos eficiente, pero tiene un precio mucho más bajo.

En los desarrollos urbanos planificados como se conocen hoy en Argentina, este tipo de

instalación podría ser de utilidad y aprovechamiento, siempre y cuando se sumen los costos de instalación y se consideren como recupero de inversión. Si bien hoy se cuenta con tecnologías y conocimientos para aprovecharlos, los desarrollos son menores, limitando la aplicación a usos privados donde predomina la sustentabilidad como aspecto a la hora de diseñar y desarrollar estas construcciones. Más aún, las investigaciones y barrios modelos pueden generar aportes considerables para poder avanzar.

Los barrios de viviendas sociales, con los métodos constructivos que hoy se conocen y los costos preponderados por los organismos oficiales, no dejan lugar a la viabilidad económica para estas instalaciones. El valor de una instalación geotérmica somera para estos barrios es elevado considerando los presupuestos y valores por unidad de vivienda que se manejan en 2022 en Argentina. Aunque la mirada es un tanto antipática, no refleja la necesidad que se tiene para avanzar en aspectos tecnológicos, emprendimientos y avances técnicos que permitan reducir los valores a fin de hacer de la energía geotérmica somera una alternativa sustentable y viable.

Resumiendo, en puntos clave de la presente investigación se tiene lo siguiente:

- Las bombas de calor geotérmicas (GHP) aprovechan la temperatura subterránea relativamente constante para proporcionar calefacción y refrigeración durante todo el año.
- Las bombas de calor geotérmicas pueden costar entre U\$S10.000 y U\$S45.000. Los precios entre U\$S20.000 y U\$S30.000 son los más típicos.
- Muchos factores influyen en el costo de los sistemas de bombas de calor geotérmicas, incluido el tamaño y eficiencia térmica de la casa, el tipo de sistema que se está instalando y la disponibilidad de incentivos.
- Los GHP tienen muchos beneficios: funcionan en todos los climas, duran mucho tiempo y su alta eficiencia significa facturas de energía más bajas y un menor impacto ambiental.

- Los GHP son una opción si se tiene un presupuesto considerable y espacio adecuado en la propiedad. También es posible que se deseen considerar las bombas de calor de fuente de aire, que también son energéticamente eficientes, pero tienen costos iniciales más bajos.
- Para barrios residenciales de tendencia social, los valores aún están en un escalón superior de rentabilidad económica, haciendo que estos sistemas sean para proyectos privados con capacidad financiera.

7 Bibliografía

(s.f.).

- Aditya, G., & Narsilio, G. (2020). Environmental assessment of hybrid ground source heat pump systems. *Geothermics*, 87, 101868. doi:10.1016/j.geothermics.2020.101868
- Alberg Østergaard, P., Mathiesen, B., Möller, B., & Lund, H. (2010). A renewable energy scenario for Aalborg Municipality based on low-temperature geothermal heat, wind power and biomass. *Energy*, 35, 4892–4901. doi:10.1016/j.energy.2010.08.041
- Alcaraz, M., Vives, L., & Vázquez-Suñé, E. (2017). The T-I-GER method: A graphical alternative to support the design and management of shallow geothermal energy exploitations at the metropolitan scale. *Renewable Energy*, 109, 213–221. doi:10.1016/j.renene.2017.03.022
- ASME. (1980). *The Equitable Building Heat Pump System*. New York: Engineering Landmark 46, brochure.
- Attard, G., Bayer, P., Rossier, Y., Blum, P., & Eisenlohr, L. (2020). A novel concept for managing thermal interference between geothermal systems in cities. *Renewable Energy*, 145, 914–924. doi:10.1016/j.renene.2019.06.095
- Bayer, P., Attard, G., Blum, P., & Menberg, K. (2019). The geothermal potential of cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 106, 17-30. doi:10.1016/j.rser.2019.02.019
- Bischof, G. (1837). Die Wärmelehre des Innern unsers Erdkörpers. *Verl. Joh. A. Barth*, 1-507.
- Buffon, G. (1778). Histoire naturelle, générale et particulière, De l'imprimerie royale. *Mémoires du Muséum National d'Histoire Naturelle*, 1-495.
- caloryfrio.com. (2023). Obtenido de <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/geotermia/bomba-de-calor-geotermica-funcionamiento-instalacion.html>
- Canter, G. (2018). Obtenido de <http://www.grupocanter.com.ar/notas/energia-geotermica>
- Carotenuto, A., Figaj, R., & Vanoli, L. (2017). A novel solar-geothermal district heating, cooling and domestic hot water system: Dynamic simulation and energy-economic analysis. *Energy*, 141, 2652–2669. doi:10.1016/j.energy.2017.08.084
- Casasso, A., & Sethi, R. (2016). G . POT : A quantitative method for the assessment and mapping of the shallow geothermal potential. *Energy*, 106, 765–773. doi:10.1016/j.energy.2016.03.091
- Casasso, A., & Sethi, R. (2017). Assessment and mapping of the shallow geothermal potential in the province of Cuneo (Piedmont, NW Italy). *Renewable Energy*, 102, 306–315. doi:10.1016/j.renene.2016.10.045
- Cordier, L. (1827). Essai sur la Température de l'Intérieure de la Terre. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* 7, 473-559.
- Crandall, A. (1946). House Heating with Earth Heat Pump. *Electrical World* 126/19, 94-95.

- Drafz, H.-J. (1972). Wasser-Wasser-Wärmepumpe in einem Einfamilienhaus. *ETA elektrowärme int* 30/A, 25.
- Dybowski, M. (1978). Wasserrechtliche Gesichtspunkte beim Einsatz von Wärmepumpen. *ETA elektrowärme int* 36/A, 111-113.
- Economía, M. d. (2020). *Argentina* . Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/eficiencia-energetica/eficiencia-energetica-en-edificaciones/etiquetado-de-viviendas>
- economía, M. d. (2020). *Ministerio de economía*. Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/eficiencia-energetica/eficiencia-energetica-en-edificaciones/viviendas-sociales>
- Egli, M. (1944). Erfahrungen aus dem Betrieb der Wärmepumpen-Heizung im Rathaus von Zürich. *Schweizerische Bauzeitung* 123/8, 87-91.
- España, A. d. (s.f.). *ACA España*. Obtenido de www.cienciasambientales.org.es
- Everett, J. (1860). On a method of reducing observations of underground temperatures. *Trans. Royal Society Edinburgh, XXII/II*, 429-439.
- Fascì, M., Lazzarotto, A., Acuna, J., & Claesson, J. (2019). Analysis of the thermal interference between ground source heat pump systems in dense neighborhoods. *Science and Technology for the Built Environment* , 25(8), 1069–1080. doi:10.1080/23744731.2019.1648130
- Florides, G., & Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications. *Renewable Energy, vol. 32, no. 15*, 2461–2478.
- Formhals, J., Feike, F., Hemmatabady, H., Welsch, B., & Sass, I. (2021). Strategies for a transition towards a solar district heating grid with integrated seasonal geothermal energy storage. *Energy, 228*, 120662. doi:10.1016/j.energy.2021.120662
- FOVISEE. (2016). *Fovisee*. Obtenido de https://www.clarin.com/arq/calefaccion-refrigeracion-gratis-usando-temperatura-tierra_0_S1rVadPwW.html#:~:text=La%20gente%20de-,Fovisee,-hizo%20la%20instalaci%C3%B3n
- Galgaro et al., A. (2015). Empirical modeling of maps of geo-exchange potential for shallow geothermal energy at regional scale. *Geothermics, 57*, 173–184. doi:10.1016/j.geothermics.2015.06.017
- Garabetian et al., T. (2020). *EGEC Geothermal Market Report*. EGEC - European Geothermal Energy Council, 9th Edition.
- García-Gil et al., A. (2015). GIS-supported mapping of low-temperature geothermal potential taking groundwater flow into account. *Renewable Energy, 77*, 268–278. doi:10.1016/j.renene.2014.11.096

- Girard, A., Gago, E., Muneer, T., & Caceres, G. (2015). Higher ground source heat pump COP in a residential building through the use of solar thermal collectors. *Renewable Energy*, *80*, 26-39. doi:10.1016/j.renene.2015.01.063
- Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G., & Blum, P. (2013). Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy*, *59*, 914–925. doi:10.1016/j.enpol.2013.04.040
- Halldin, S., Jansson, P.-E., & Lundkvist, H. (1979). Ecological Effects of Longterm Soil Heat Pump Use. *Proc. Nordic Symposium of Earth Heat Pump Systems*, 14-23.
- Iannelli, L. M. (Febrero de 2013). Acondicionamiento Térmico de Aire mediante el uso. *Acondicionamiento Térmico de Aire mediante el uso*.
- Jensen, J., Ommen, T., Markussen, W., & Elmegaard, B. (2017). Design of serially connected district heating heat pumps utilising a geothermal heat source. *Energy*, *137*, 865–877. doi:10.1016/j.energy.2017.03.164
- Kircher, A. (1665). *Mundus Subterraneus, 2 Volumes*. Amsterdam: J. Jansson & E. Weyerstraten.
- Kljajić, M., Anđelković, A., Hasik, V., Munćan, V., & Bilec, M. (2020). Shallow geothermal energy integration in district heating system: An example from Serbia. *Renewable Energy*, *147*, 2791–2800. doi:10.1016/j.renene.2018.11.103
- Knoblich, K., Sanner, B., & Klugescheid, M. (1993). Energetische, hydrologische und geologische Untersuchungen zum Entzug von Wärme aus dem Erdreich. *Giessener Geologische Schriften* *49*, 1-192.
- Kriesi, R. (2017). *Methoden der Erdsonden-Regeneration mit Sekundärnutzen oder tiefen Wärmekosten*. Amt für Hochbauten Stadt Zürich, Schlussbericht.
- Kupffer, A. (1829). Über die mittlere Temperatur der Luft und des Bodens auf einigen Punkten des östlichen Russlands. *Ann. Phys. Chem.* *91*, 159-192.
- Lebour, G. (1882). On the present State of our Knowledge of Underground Temperature, with special Reference to the Nature of the Experiments still required in order to improve this Knowledge. *Trans. North of England Inst. Min. and Mechan. Eng.* *XXXI*, 59-73 and 204-205.
- Lui, Z., Xu, W., Zhai, X., Qian, C., & Chen, X. (2017). Feasibility and performance study of the hybrid ground-source heat pump system for one office building in Chinese heating dominated areas. *Renewable Energy*, *101*, 1131–1140. doi:10.1016/j.renene.2016.10.006
- Lund et al., H. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, *68*, 1-11. doi:10.1016/j.energy.2014.02.089
- Lund, J., & Toth, A. (2020). *Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review*. Reykjavik, Iceland: World Geothermal Congress.
- Lund, R., & Persson, U. (2016). Mapping of potential heat sources for heat pumps for district heating in Denmark. *Energy*, *110*, 129–138. doi:10.1016/j.energy.2015.12.127

- Michopoulos, A., Papakostas, K., & Kyriakis, N. (2011). Potential of autonomous ground-coupled heat pump system installations in Greece. *Applied Energy*, *88*(6), 2122–2129. doi:10.1016/j.apenergy.2010.12.061
- Miglani, S., Orehounig, K., & Carmeliet, J. (2018). A methodology to calculate long-term shallow geothermal energy potential for an urban neighbourhood. *Energy and Buildings*, *159*, 462–473. doi:10.1016/j.enbuild.2017.10.100
- Miglani, S., Orehounig, K., & Carmeliet, J. (2018). Integrating a thermal model of ground source heat pumps and solar regeneration within building energy system optimization. *Applied Energy*, *218*, 78–94. doi:10.1016/j.apenergy.2018.02.173
- Müller, P. (1978). Untersuchungen der Auswirkung des Betriebs von Wärmepumpensystemen auf die Umwelt. *ETA elektrowärme int 36/A*, 307-312.
- Muñoz et al., M. (2015). Estimating low-enthalpy geothermal energy potential for district heating in Santiago basin–Chile (33.5 °S). *Renewable Energy*, *76*, 186–195. doi:10.1016/j.renene.2014.11.019
- Nguyen, H., Law, Y., Alavy, M., Walsh, P., Leong, W., & Dworkin, S. (2014). An analysis of the factors affecting hybrid ground-source heat pump installation potential in North America. *Applied Energy*, *125*, 28–38. doi:10.1016/j.apenergy.2014.03.044
- Pahud, D. (2013). A Case Study: The Dock Midfield of Zurich Airport. *Energy Gestructures, John Wiley & Sons, Ltd*, 281–296. doi:10.1002/9781118761809.ch14
- Perego, R., Pera, S., & Galgaro, A. (2019). Techno-Economic Mapping for the Improvement of Shallow Geothermal Management in Southern Switzerland. *Energy*, *122*(2), 279. doi:10.3390/en12020279
- Rad, F., Fung, A., & Leong, W. (2013). Feasibility of combined solar thermal and ground source heat pump systems in cold climate, Canada. *Energy and Buildings*, *61*, 224–232. doi:10.1016/j.enbuild.2013.02.036
- Reich, F. (1834). Beobachtungen über die Temperatur des Gesteins in verschiedenen Tiefen in den Gruben des sächsischen Erzgebirges. *Verlag J.G. Engelhardt*, 1-205.
- Rittinger, P. (1855). Theoretisch-praktische Abhandlung über ein für alle Gattungen von Flüssigkeiten anwendbares neues Abdampfverfahren mittelst einer und derselben Wärmemenge, welche zu diesem Behufe durch Wasserkraft in ununterbrochenen Kreislauf versetzt wird. *Verlag Fr. Manz*, 1-43.
- Rivera, J., Blum, P., & Bayer, P. (2017). Increased ground temperatures in urban areas: Estimation of the technical geothermal potential. *Renewable Energy*, *103*, 388–400. doi:10.1016/j.renene.2016.11.005
- Rohner, E. (1991). Entwicklung und Stand der Erdsonden-Anlagen in der Schweiz. *Symp. Erdgek WP Rauschholzhausen, IZW-Berichte 3/91*, 33-40.

- Sanner, B. (1986). Schwalbach Ground Coupled Heat Pump Research Station. *Newsletter IEA Heat Pump Center* 4/4, 8-10.
- Sanner, B. (1992). Erdgekoppelte Wärmepumpen - Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation. *IZW-Berichte* 2/92, 1-328.
- Sanner, B. (2005). Die erdgekoppelte Wärmepumpe wird 60 Jahre alt. *bbr* 56, 12/05, 60-67.
- Santamouris, M. (2016). Cooling the buildings – past, present and future. *Energy and Buildings*, 128, 617–638. doi:10.1016/j.enbuild.2016.07.034
- Schiel, K., Baume, O., Caruso, G., & Leopold, U. (2016). GIS-based modelling of shallow geothermal energy potential for CO 2 emission mitigation in urban areas. *Renewable Energy*, 86, 1023–1036. doi:10.1016/j.renene.2015.09.017
- SMN. (2010). *Servicio Meteorológico Nacional*. Obtenido de <https://www.smn.gob.ar/>
- SolarReviews. (22 de Sep de 2022). *Geothermal heat pumps: Costs, types & benefits*. Obtenido de <https://www.solarreviews.com/blog/guide-to-geothermal-heat-pumps>
- Soltani et al., M. (2019). A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems. *Sustainable Cities and Society*, 44, 793–818. doi:10.1016/j.scs.2018.09.036
- Stegnar et al., G. (2019). A framework for assessing the technical and economic potential of shallow geothermal energy in individual and district heating systems: A case study of Slovenia. *Energy*, 180, 405–420. doi:10.1016/j.energy.2019.05.121
- Thomson, W. (1853). On the economy of the heating or cooling of buildings by means of currents of air. *Proc Philosophical Soc Glasgow 1853/III*, 269–272.
- Thomson, W. (1860). On the Reduction of Observations of Underground Temperature. *Trans. Royal Society Edinburgh XXII/II*, 405-427.
- Tissen, C., Menberg, K., Bayer, P., & Blum, P. (2019). Meeting the demand: geothermal heat supply rates for an urban quarter in Germany. *Geotherm Energy*, 7(1), 9. doi:10.1186/s40517-019-0125-8
- Unternährer, J., Moret, S., Joost, S., & Maréchal, F. (2017). Spatial clustering for district heating integration in urban energy systems: Application to geothermal energy. *Applied Energy*, 190, 749–763. doi:10.1016/j.apenergy.2016.12.136
- Vienken, T., Kreck, M., & Dietrich, P. (2019). Monitoring the impact of intensive shallow geothermal energy use on groundwater temperatures in a residential neighborhood. *Geothermal Energy*, 7(1), 8. doi:10.1186/s40517-019-0123-x
- Von Humboldt, A. (1799). *Ueber die unterirdischen Gasarten und die Mittel ihren Nachtheil zu vermeiden*. Braunschweig: Vieweg.
- Wagner, R., & Weisskopf, T. (2014). *Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich*. Amt für Hochbauten Stadt Zürich, Schlussbericht.

- Walch, A., Mohajeri, N., Gudmundsson, A., & Scartezzini, J.-L. (2021). Quantifying the technical geothermal potential from shallow borehole heat exchangers at regional scale. *Renewable Energy*, 165, 369–380. doi:10.1016/j.renene.2020.11.019
- Waterkotte, K. (1972). Erdreich-Wasser-Wärmepumpe für ein Einfamilienhaus. *ETA elektrowärme int* 30/A, 39-43.
- Werner, S. (2017). International review of district heating and cooling. *Energy*, 137, 617–631. doi:10.1016/j.energy.2017.04.045
- Wirth, E. (1955). Aus der Entwicklungsgeschichte der Wärmepumpe. *Schweizerische Bauzeitung* 73/42, 647-651.
- WTA. (1981). *Wärmepumpen-Energiequellen in Theorie und Praxis, company brochure*. Worms.
- Zhang, Y., Soga, K., & Choudhary, R. (2014). Shallow geothermal energy application with GSHPs at city scale: study on the City of Westminster. *Géotechnique Letters*, 4(2), 125–131. doi:10.1680/geolett.13.00061
- Zogg, M. (2008). *Geschichte der Wärmepumpe, Schweizer Beiträge und internationale Meilensteine*. Bern: Bundesamt für Energie.