

# Refrigeración del Metro con Geotermia

## Retos y experiencias de un caso real: Metro Madrid – Estación Pacífico

**Autor(es) de la comunicación:** M.G.J. Hendriks<sup>1</sup>, J.M. Cubillo Redondo<sup>2</sup>, M.A. Cuesta García<sup>3</sup>,

1 IFTec GeoEnergía S.L.; C/ Doctor Esquerdo 10, 4º centro, 28028 Madrid; [m.hendriks@iftec.es](mailto:m.hendriks@iftec.es)

2 Metro Madrid S.A., Unidad de Ingeniería de Instalaciones y Obras; [jm\\_cubillo@mail.metromadrid.es](mailto:jm_cubillo@mail.metromadrid.es)

3 Termoterra S.L.; C/ Miguel Yuste 45, 28037 Madrid; [maria-ac@terratest.es](mailto:maria-ac@terratest.es)

**Resumen:** En los túneles del Metro existe una carga térmica interna (usuarios, iluminación, frenos de los trenes, etc.) que provoca con el transcurso del tiempo un incremento de la temperatura y un aumento de la necesidad de refrigeración. En varios países se están llevando a cabo estudios y proyectos con el fin de refrigerar la red de Metro, entre ellos, el intercambio de energía térmica con el subsuelo o agua subterránea. En la subestación de Pacífico del METRO de MARID se realizó en 2009 un proyecto piloto para refrigerar andenes, oficinas y locales comerciales de la estación mediante un sistema de bomba de calor geotérmico. Un factor fundamental para el diseño y la realización del sistema fue el equilibrio energético en el terreno. En el caso de que sólo exista disipación de calor al subsuelo dará lugar a un incremento de las temperaturas en el terreno y como consecuencia una reducción gradual de la eficiencia del sistema geotérmico. En los Metros en general sólo existe demanda de refrigeración, existiendo riesgo de desequilibrio térmico. Es importante restaurar el equilibrio energético mediante la extracción de calor del terreno. Dado que el Metro no dispone por sí mismo de la necesidad de calefacción son necesarias alternativas para el destino de este calor. De este modo el sistema geotérmico del Metro puede ser utilizado como fuente de calor para otros edificios u otros usos alternativos.

**Palabras clave:** Metro Madrid, refrigeración geotérmica, sistema bomba de calor geotérmico, equilibrio térmico

### 1. INTRODUCCIÓN

La refrigeración geotérmica está en estos últimos años ganando terreno aplicándose en edificios residenciales, comerciales e institucionales. Actualmente se está también aplicando en infraestructuras subterráneas como la red de Metro. En varias ciudades se está investigando la posibilidad de aplicar esta tecnología para la refrigeración de los sistemas de transporte subterráneo. El Metro de Viena ya dispone en algunas de sus instalaciones de sistemas geotérmicos mientras que en Madrid se acaba de poner en marcha un proyecto piloto que comenzó a funcionar en verano de 2009.

A continuación, se presentan los detalles del sistema geotérmico aplicado en la estación Pacífico del METRO de MADRID.

### 2. REFRIGERACIÓN EN METROS

En varios países se están llevando a cabo estudios y proyectos pilotos con el fin de refrigerar la red de Metro mediante el intercambio de energía térmica con el subsuelo o agua subterránea.

En los túneles del Metro se va produciendo un calentamiento paulatino debido, en parte, a los motores y sistemas de frenado de los trenes y, en parte, al efecto de los pasajeros y alumbrados y equipos de las estaciones. La mayor parte del calor se genera en el interior de las estaciones. Parte del calor es cedido al subsuelo provocando un aumento progresivo de la temperatura en el subsuelo alrededor de los túneles. Debido al calentamiento del subsuelo disminuye la posibilidad de cesión de calor resultando así en un incremento de la temperatura en el túnel que aumenta la necesidad de refrigeración de los mismos.

El fenómeno de calentamiento progresivo se produce especialmente en sistemas antiguos con túneles profundos y donde existe poca ventilación. Éste es el caso del Metro de Londres donde en



verano en varias de sus líneas la temperatura se sitúa muy por encima de los 30 °C. Para resolver el problema del calentamiento se ha iniciado, bajo el lema *Cooling the tube*, un programa de investigación y medidas con este fin. En el marco de este programa, la Universidad de London South Bank ha investigado y desarrollado propuestas para refrigerar los túneles de metro con la utilización de agua subterránea y soluciones geotérmicas para realizar el almacenamiento del calor durante el día y disiparlo durante las horas nocturnas (THOMPSON, J.A. (2006)).

En Viena se han implantado con éxito en cuatro estaciones de Metro sistemas geotérmicos que intercambian calor y frío con el subsuelo mediante cimentaciones termoactivas. Se aplican los sistemas para calefacción y refrigeración. La potencia total de los cuatro sistemas geotérmicos es de 449 kW en calor y de 231 kW en frío (UNTERBERGER, W (2004)).

Para conseguir una refrigeración eficiente y evitar la necesidad de equipos de disipación de calor en la superficie (por ejemplo aero-refrigeradores (dry coolers)) se han realizado estudios de la aplicación de refrigeración geotérmica en las estaciones del metro de Nueva York, entre ellas la estación de la quinta avenida. Por la información de la que disponemos, los estudios todavía no han dado como resultado la realización de sistemas de refrigeración geotérmica en las estaciones del metro de Nueva York.

### 3. SISTEMA GEOTÉRMICO - METRO PACÍFICO

El método de intercambio de energía térmica con el subsuelo aplicado en la subestación de Pacífico es un sistema de bomba de calor geotérmico (BCG). El principio de funcionamiento se muestra en la figura 1.

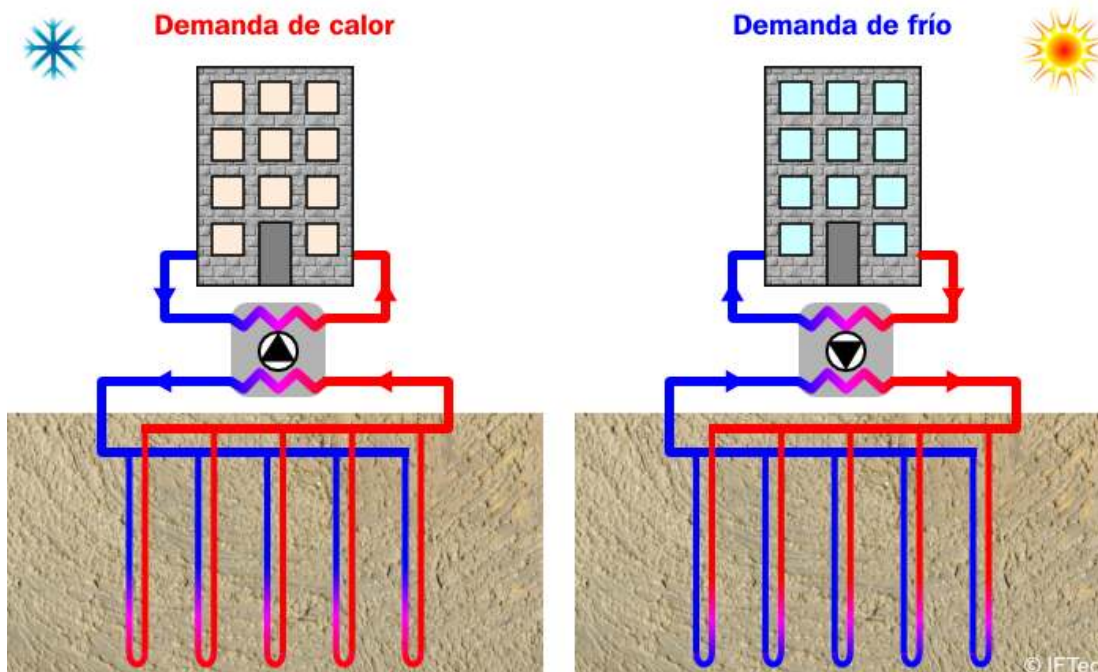


Figura 1. Principio de funcionamiento de un sistema BCG.

En invierno la bomba de calor utiliza el subsuelo como fuente de calor, funcionando a modo de calefacción, y en verano a modo de refrigeración como disipador de calor. Para el intercambio de energía térmica se conecta la bomba de calor con el subsuelo con un lazo que, en el caso del proyecto Metro Pacífico, consiste en tubos en forma de "U" de polietileno de alta densidad



introducidos en 32 perforaciones de una profundidad media de 145 metros. El conjunto del campo de sondeos geotérmicos forma un Intercambiador de Calor Terrestre (ICT) en el que circula un fluido para realizar intercambios térmicos con el subsuelo. La composición del fluido en el intercambiador de calor terrestre depende de las características del proyecto pudiendo tener agua sin aditivos o agua con un anticongelante. En el caso del proyecto Metro Pacífico se utiliza agua sin aditivos.



Foto: Termoterra

**Figura 2.** *Introducción de la perforadora (RB 8R)*

Los sondeos geotérmicos del ICT se realizaron en junio y julio de 2008 durante la construcción de una nueva subestación. La figura 2 muestra la maniobra de introducción del equipo de perforación para ejecutar las perforaciones en una sala subterránea de la subestación cuya cota se encuentra a unos 10 m por debajo del nivel de la calle. La perforadora utilizada es una Prakla RB8R que tiene un sistema de perforación mixto permitiendo tanto la perforación neumática como la hidráulica incluso con circulación de lodos si es necesario. Este tipo de máquina se puede adaptar a todo tipo de geología para garantizar la correcta ejecución de las sondas geotérmicas.

El diámetro de los sondeos realizados es de 119 mm. Cada sondeo contiene en su interior una sonda/tubo de polietileno (PE100 SDR 11, 40x3,7) en forma de “U”. Posteriormente a la instalación de las sondas los sondeos han sido correctamente sellados con una lechada de cemento-bentonita especialmente fabricada para rellenos de sondeos geotérmicos.

Los sondeos geotérmicos están conectados en ocho grupos de cuatro sondeos según el principio del sistema Tichelmann para evitar diferencias en la pérdida de carga entre los sondeos y equilibrar el caudal sobre el ICT.

#### **4. CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO**

El proyecto se encuentra dentro de la unidad hidrogeológica Madrid-Talavera (UH 03.05). La hidrogeología consiste en formaciones porosas y fisuradas, ocasionalmente con acuíferos aislados de interés local. En el mapa hidrogeológico se describe la litología como arcilla y margas, margocalizas, calizas, silex, sepiolitas y niveles arenosos. La transmisividad es muy baja (alrededor de 5 m<sup>2</sup>/d).

La geología encontrada durante la ejecución de las perforaciones consiste en una marga de color gris compacta, dura y arcillosa conocida comúnmente como “peñuela”. La columna litológica se resume en la tabla I.



**Tabla I.** *Columna litológica*

Profundidad [m]	Tipo de suelo y mezclas	Modo del detrito	Modo de perforación	Color
0 – 67	Marga (peñuela)	compacta	difícil de perforar	gris
67 – 93	Marga (peñuela), fg, mg	compacta	difícil de perforar	gris
93 - 106	Marga (peñuela)	compacta	difícil de perforar	castaño claro
106 – 119	Marga (peñuela), fg, ms	compacta	difícil de perforar	castaño claro
119 – 145	Marga (peñuela)	compacta	difícil de perforar	gris
Abreviaciones:	fg = gravas finas / mg = gravas medias / ms = arenas medias			
Nivel freático:	no encontrado			

Para determinar la conductividad térmica del terreno se realizó un ensayo de respuesta térmica, ERT (*TRT – Thermal Response Test*). Este ensayo consiste en hacer circular durante 74 horas un fluido portador de calor a través de la sonda y monitorear la temperatura de entrada y salida. El ERT es un procedimiento experimental que permite la determinación “in situ” de la conductividad térmica ( $\lambda$ ) del suelo. Una condición importante es que durante la duración del experimento la potencia de inyección de calor sea constante y conocida.

La  $\lambda$  determinada para el proyecto Metro Pacífico es de 1,49 W/m.K. Es un valor bajo que coincide con los valores mínimos para margas que se encuentran en normas internacionales (ver Tabla II).

**Tabla II.** *Conductividad térmica ( $\lambda$ ); rango de valores para margas según normas internacionales*

Tipo de suelo	VDI 4640 <sup>(1)</sup>		EED <sup>(2)</sup>	
	Rango	Típico	Rango	Recomendado
Margas <i>Inglés: Marl</i>	1,5 – 3,5	2,1	1,75 – 3,46	2,1
Marga arcillosa <i>Marl, clayey / argillaceous</i>			1,49 – 2,52	2,0
(1) VDI-Richtlinien 4640; Thermal Use of the underground, Part 1, 2000				
(2) Earth Energy Designer, Version 3.13, Jan. 2008				

La temperatura del subsuelo depende de los siguientes factores:

- Flujo de calor desde el núcleo de la Tierra.
- Características geotérmicas del subsuelo; capacidad y conductividad térmica.
- Temperatura media de la superficie.
- Fuentes de calor en el subsuelo.
- Flujo del agua subterránea.

Cuando dichos factores se presentan estables, se forma un gradiente de temperatura constante en el subsuelo que suele estar en el rango de 2 a 3 °C por 100 m.

Para comprobar el perfil de la temperatura se realizaron mediciones en sondeos del ICT. Los resultados se muestran en la figura 3 en la que se muestra también el perfil supuesto partiendo de un gradiente de 2,5 °C por 100 m y la temperatura anual media que es en Madrid de 14,6 °C (fuente: [www.aemet.es](http://www.aemet.es)).

Los resultados de las mediciones muestran temperaturas mayores de lo que se esperaban. La temperatura media medida sobre la longitud de los sondeos geotérmicos es de unos 21 °C mientras que la temperatura media supuesta era de unos 17 °C. Es probable que la temperatura en el terreno esté afectada por el “efecto isla de calor urbano”, una situación urbana de acumulación de calor por la inmensa mole de hormigón, y demás materiales absorbentes de calor. Este efecto se presenta en



las grandes ciudades por la dificultad de disipación del calor durante las horas nocturnas, cuando las áreas no urbanas se enfrían notablemente por la falta de acumulación de calor.

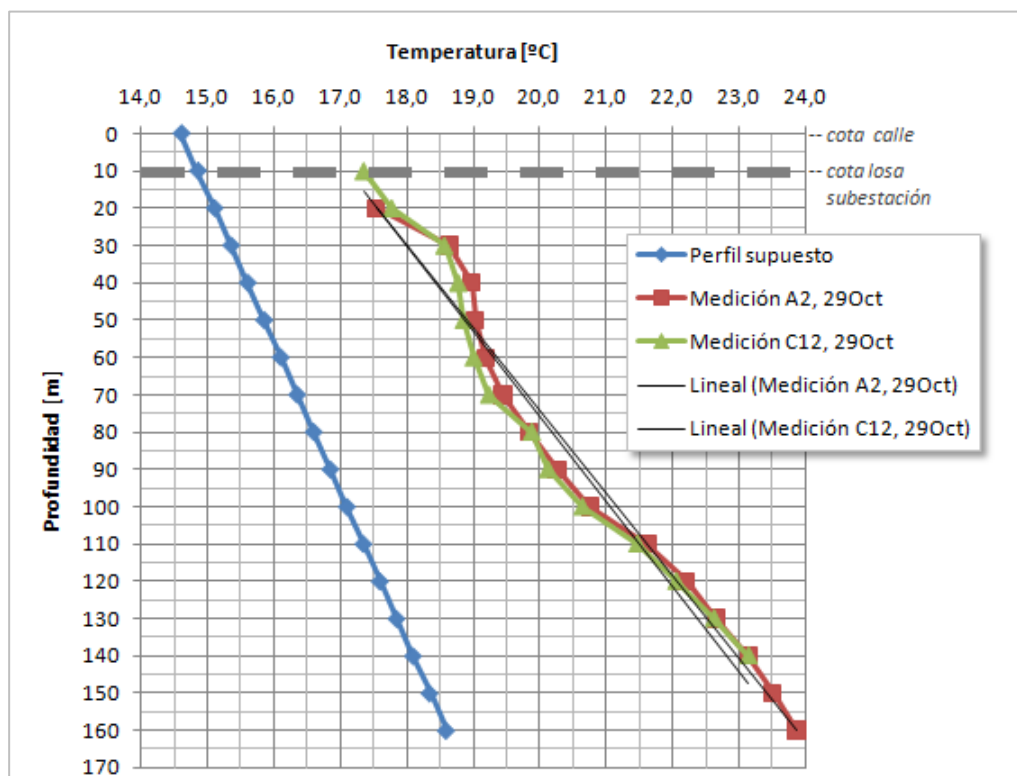


Figura 3. Temperatura natural del terreno; perfil supuesto y resultados de mediciones reales.

## 5. EL RETO DEL EQUILIBRIO TÉRMICO

En el caso de Metro Pacífico, como en la mayoría de todas las redes de Metros, existe un gran desequilibrio entre la demanda de frío y la demanda de calor. Los puntos de partida iniciales del proyecto geotérmico se resumen en la tabla III.

Tabla III. Puntos de partida iniciales del sistema geotérmico – Metro Pacífico

	Unidad	Refrigeración	Calefacción
Carga pico	kW <sub>t</sub>	120	20
Demanda anual	MWh <sub>t</sub>	130	20,5
Disipación/extracción anual de calor al/del terreno <sup>1)</sup>	MWh <sub>t</sub>	162,5	-15,4
Desequilibrio térmico en el terreno	MWh <sub>t</sub> /año	147,1	

<sup>1)</sup> Calculado con un COP/EER media de 4

Debido a la gran diferencia entre la demanda anual de frío y la demanda anual de calor, si no hubiera habido mejoras en el diseño, habría existido un gran desequilibrio térmico en el terreno. Desencadenando en cada año de funcionamiento de la instalación un incremento progresivo de la temperatura en el terreno. Para evitar una disminución en la eficiencia del sistema BCG se modificó el diseño del sistema para equilibrar el balance térmico del mismo y evitar este calentamiento.



Para equilibrar el balance energético anual en el terreno se utiliza un intercambiador de calor de placas con el que se suministra en invierno calefacción directa (*Direct Heating*) sin aplicar una bomba de calor. El *Direct Heating* hace posible disipar el calor sobrante del terreno en invierno de forma eficiente y usarlo para el tratamiento del aire en los andenes (mediante el uso de fancoils) y para una cortina de aire caliente en el vestíbulo de la estación de metro. El concepto energético mejorado y definitivo se muestra en la siguiente figura.

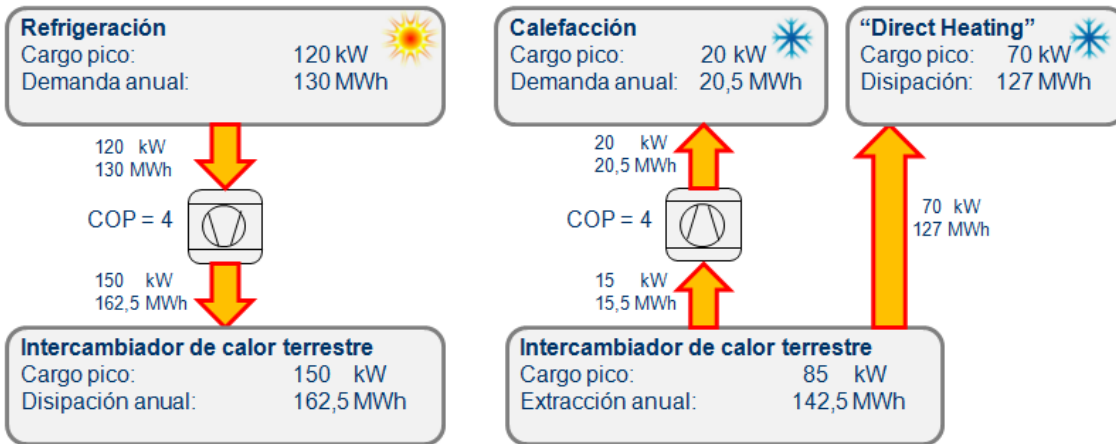


Figura 4. Datos energéticos del sistema geotérmico con *Direct Heating* para restaurar el equilibrio energético

Las simulaciones realizadas con el programa EED (*Earth Energy Designer*) muestran que el *Direct heating* mejora el funcionamiento del sistema de forma significativa. La figura 5 muestra las temperaturas promedio máximas del fluido en el circuito del intercambiador de calor terrestre (ICT) con y sin *Direct Heating* a lo largo de un periodo de funcionamiento de 25 años. Las curvas “carga pico” corresponden a las temperaturas más altas durante el funcionamiento en verano a carga máxima. Las curvas “carga base” corresponden a las temperaturas cuando el sistema está aportando frío funcionando en carga base.

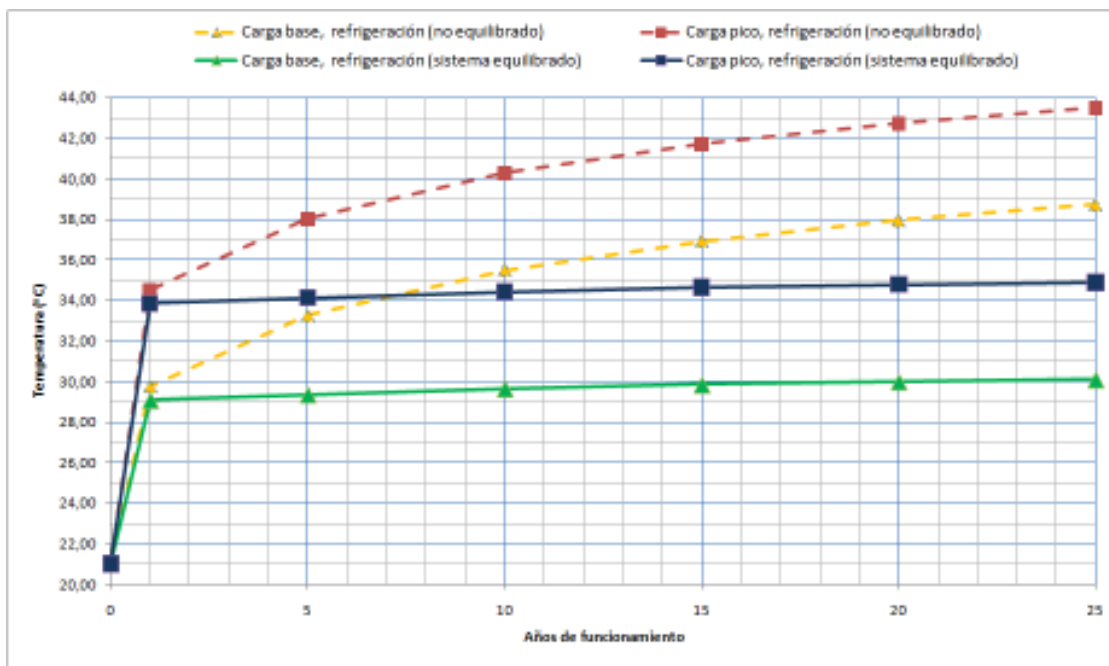


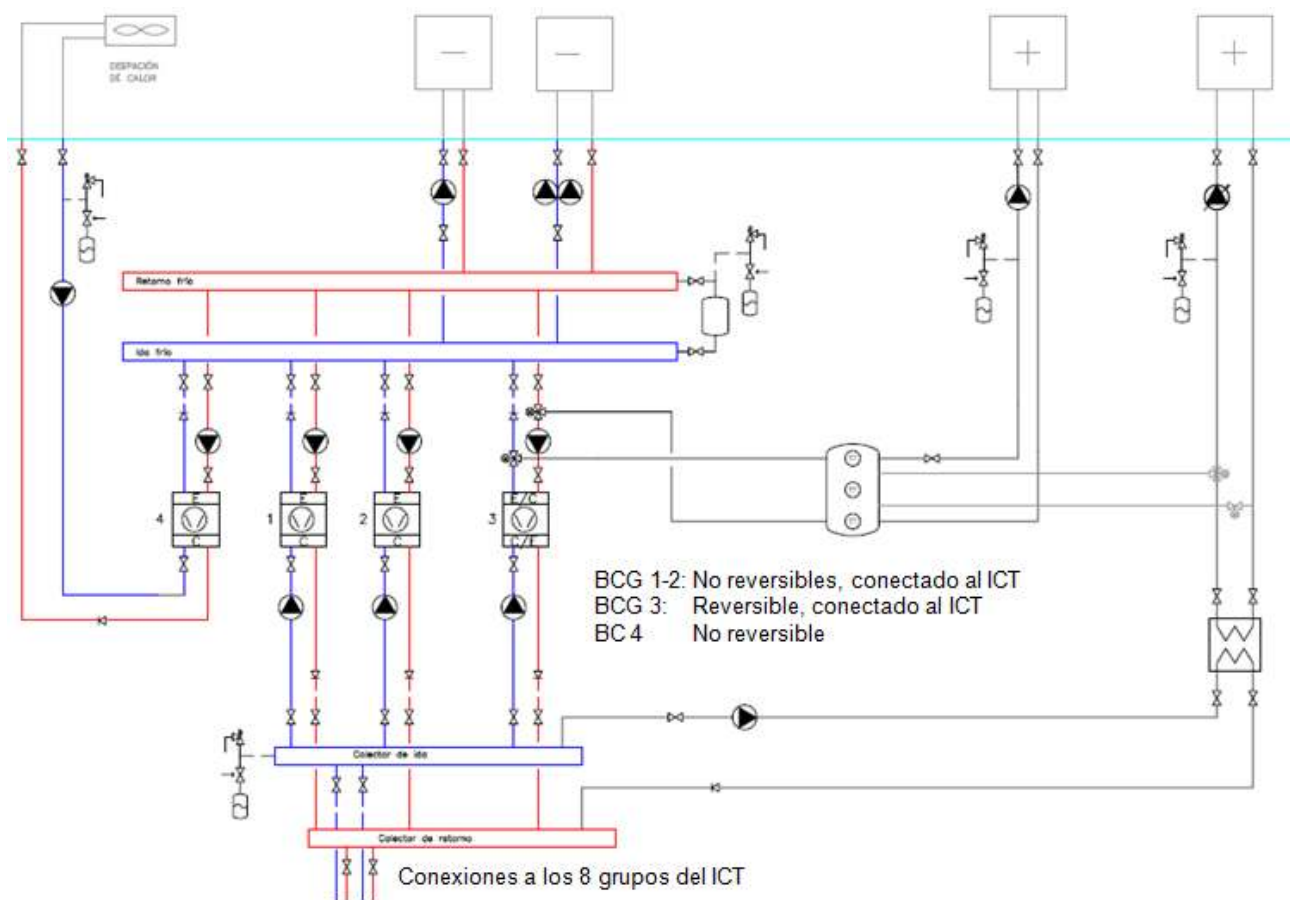
Figura 4. Temperaturas medias máximas del fluido en el ICT, durante 25 años de funcionamiento



La eficiencia de una bomba de calor en modo de refrigeración depende de la temperatura de salida del condensador. En la situación mejorada (sistema equilibrado por *Direct Heating*) se limitan las temperaturas máximas en el ICT a niveles que permitan una alta eficiencia (EER).

## 6. INSTALACIÓN EN LA SALA TÉCNICA

La instalación en la sala técnica consta de tres bombas de calor geotérmicas (dos no reversibles y una reversible) conectadas al ICT y de una bomba de calor de respaldo (*back-up*) para aumentar la potencia de frío y cubrir la demanda en los momentos picos. La bomba de calor de apoyo no está conectada al ICT y disipa el calor del condensador por medio de un dry-cooler (aero-refrigerador) al ambiente. La figura 5 muestra el esquema principal de la instalación.



**Figura 5.** Esquema principal simplificado de la instalación en la sala técnica

Las características principales del sistema BCG se resumen a continuación:

### Refrigeración

Potencia mínima de frío: 120 kW - 160 kW con la bomba de calor de respaldo  
Temperatura de suministro: 10 °C  
COP promedio en modo de refrigeración: > 4,0



### Calefacción activa, con la bomba de calor reversible

Potencia mínima de calor:	20 kW
Temperatura de suministro:	40 °C
COP promedio en modo de calefacción:	$\geq 3,6$

### Calefacción pasiva (*Direct heating*)

Potencia mínima de calor:	70 kW
Temperatura de suministro:	28 °C → 18 °C <i>la temperatura disminuirá a largo del invierno</i>

## **7. CONCLUSIONES**

Un factor fundamental para el funcionamiento sostenible y eficaz de un sistema geotérmico es el equilibrio térmico en el terreno. En las redes de Metro la demanda de refrigeración supera a la demanda de calefacción existiendo un riesgo de desequilibrio térmico. Es importante por ello, restaurar el equilibrio energético mediante la extracción de calor de terreno. Dado que el Metro no dispone por sí mismo de gran necesidad de calefacción son necesarias alternativas para el destino de éste. En esta línea se puede pensar en redes de distrito donde se pueda realizar un aporte del calor sobrante para la calefacción de edificios cercanos al Metro.

## **8. REFERENCIAS**

TOMPSON, J.A. et al. (2006): "Evaluation of underground railway networks operating sustainable cooling systems". Paper at Engineering the Future, CIBSE Conference

UNTERBERGER, W et al. (2004): "Utilization of Tunnels as Source of Ground Heat and Cooling – Practical Applications in Austria".

*"Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo a la Comunidad de Madrid una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros".*