

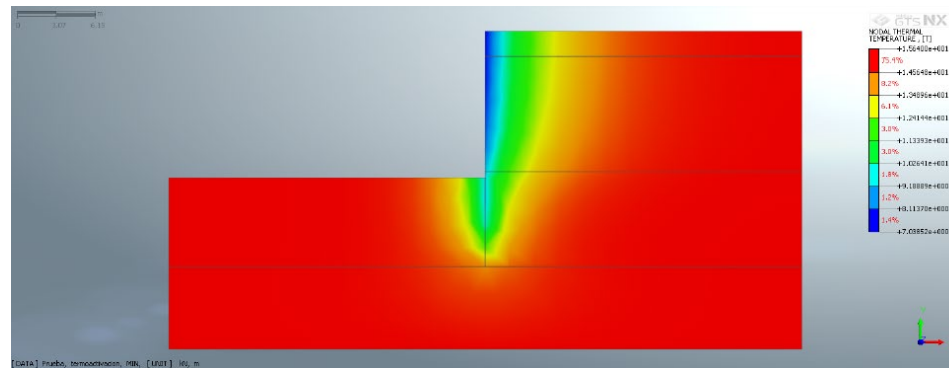
Madrid genera energía limpia:

la termoactivación del túnel en el soterramiento de la A5



POLITÉCNICA

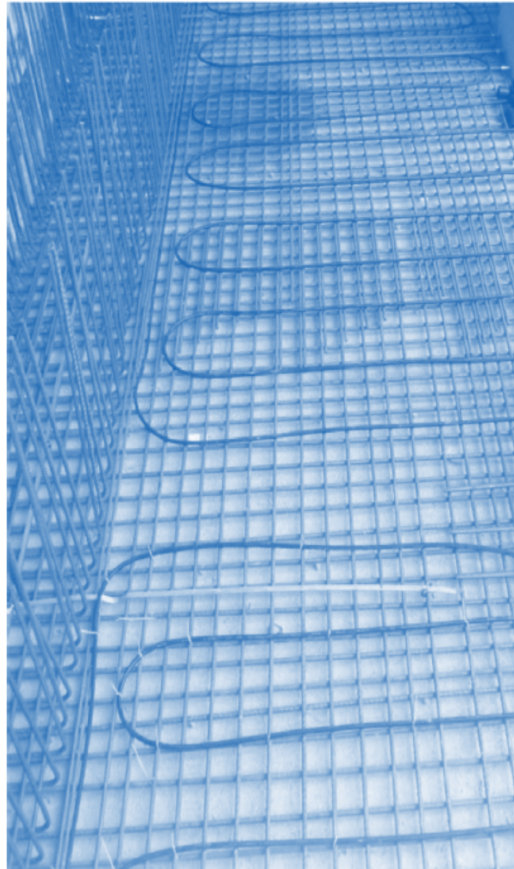
LA TERMOACTIVACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS COMO MEDIO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA



Ignacio González Tejada
Universidad Politécnica de Madrid

30 de mayo de 2025

Contenidos



1. Motivación
2. La energía geotérmica de baja temperatura
3. Termoactivación de cimentaciones, túneles y muros
4. Valoración del recurso geotérmico
5. Valoración del efecto estructural
6. Cimentaciones termoactivas y redes de calor y frío
7. Conclusiones



1. Motivación

1. Motivación



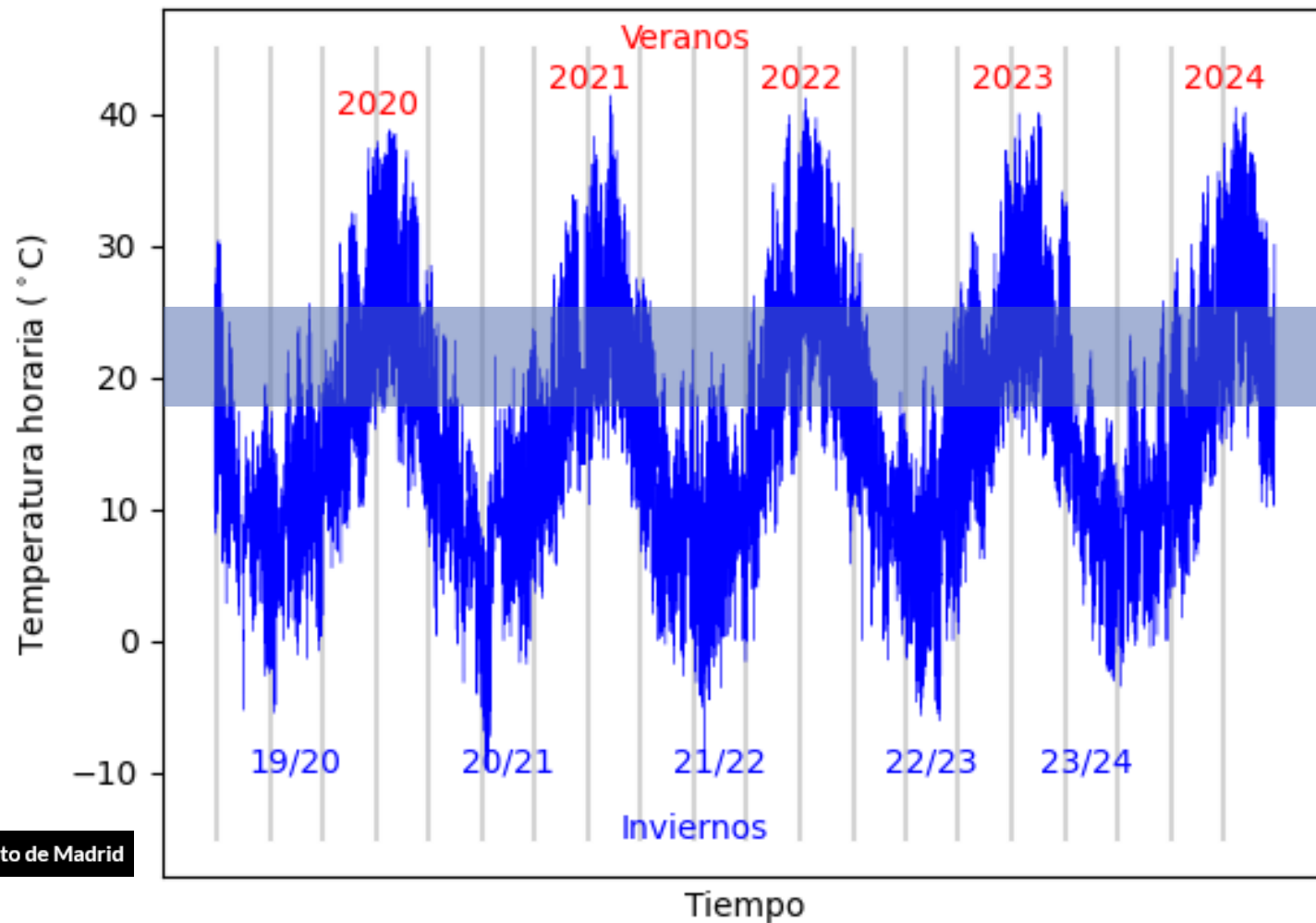
- Calentamiento y enfriamiento
 - La mitad de la energía consumida en Europa es directamente en forma de calor
 - 26.2% proviene de energía renovable
- Edificios residenciales y comerciales
 - 25 % de la energía consumida en el mundo
 - 28 % de las emisiones de CO2 a nivel mundial
 - Calefacción, refrigeración, ACS = 80 % del consumo energético (calefacción: 65%)
 - Más del 50 % proviene de combustibles fósiles



1. Motivación



1. Motivación

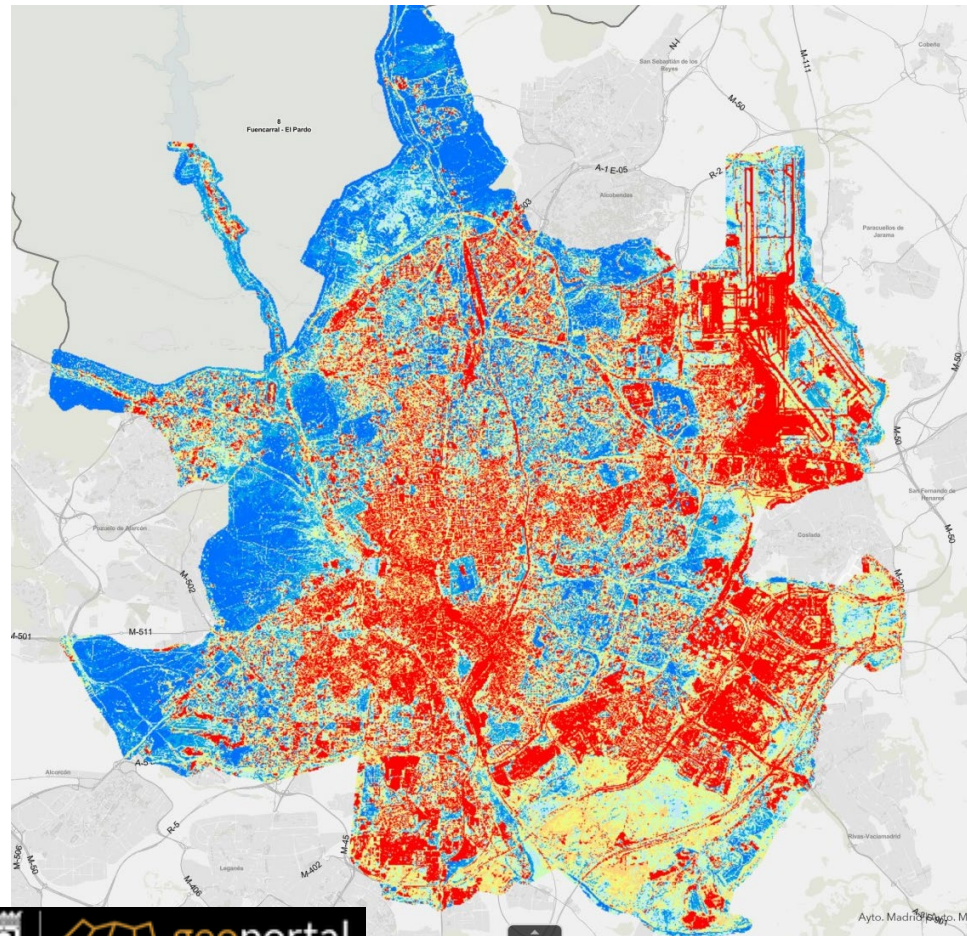


1. Motivación

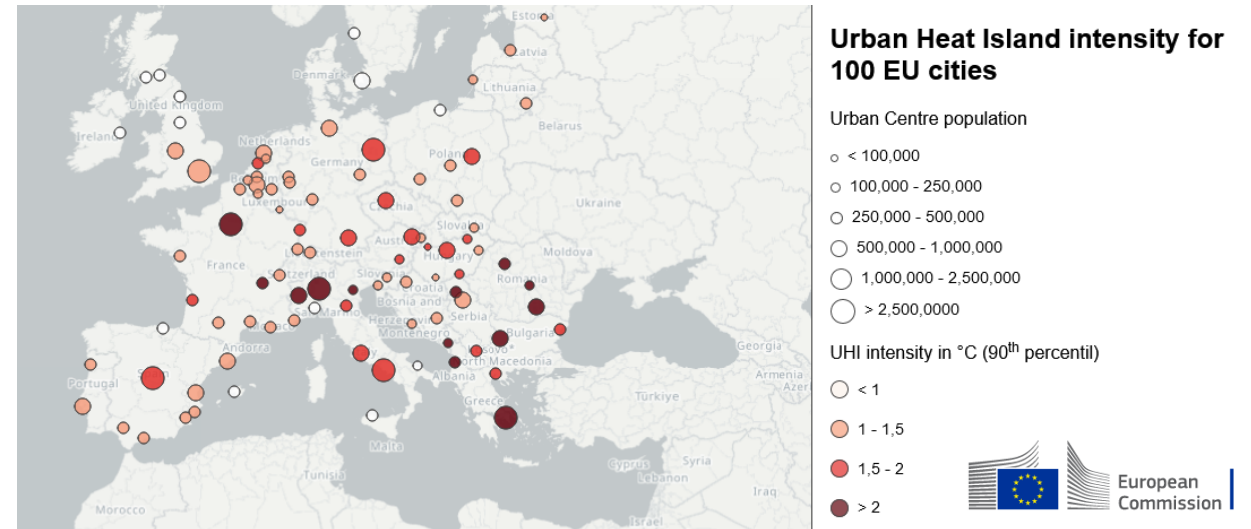


Sistema de calefacción	Rendimiento	Emisiones (gCO ₂ eq/kWh)
Caldera de gas	1 x	190
Aerotermia	3 x	127 (central de gas) 48 (red eléctrica) 0 (renovable / nuclear)
Geotermia de baja temperatura	4 x	95 (central gas) 37 (red eléctrica) 0 (renovable / nuclear)

1. Motivación



Efecto Isla de Calor

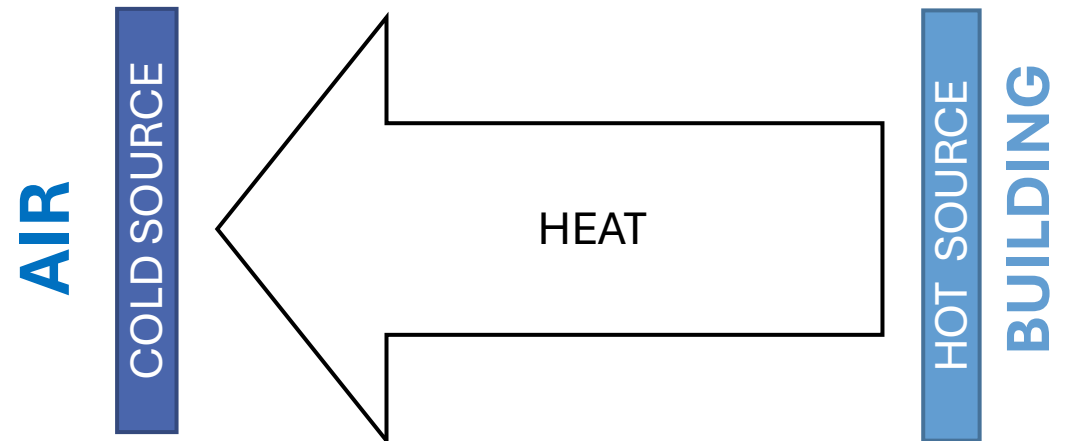
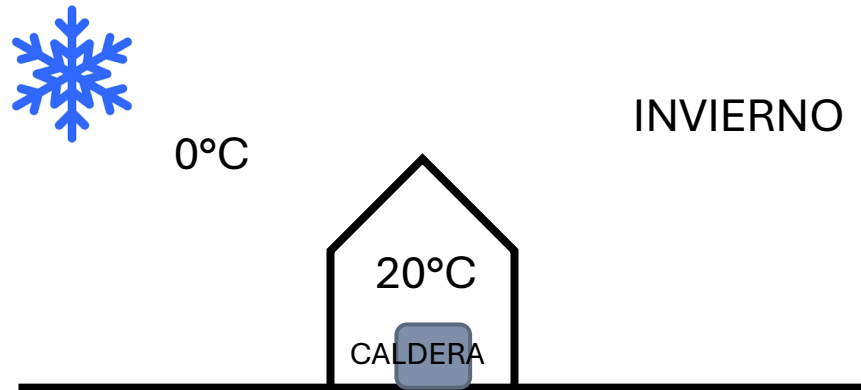


- Temperaturas + 4 y 6 °C de media
- Picos de +10 °C
- En Madrid +2°C (percentil 90%), picos de +8°C

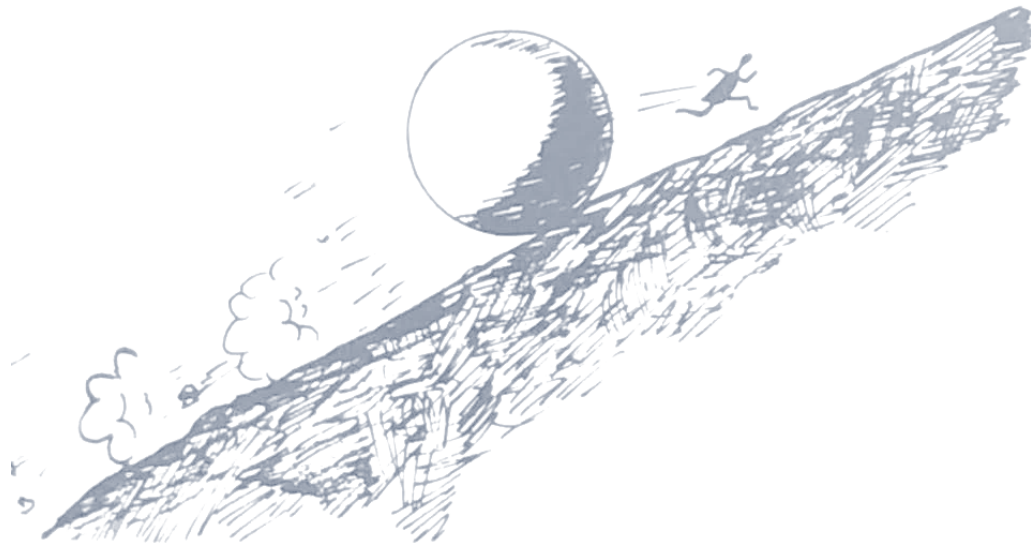


2. La geotermia de baja temperatura

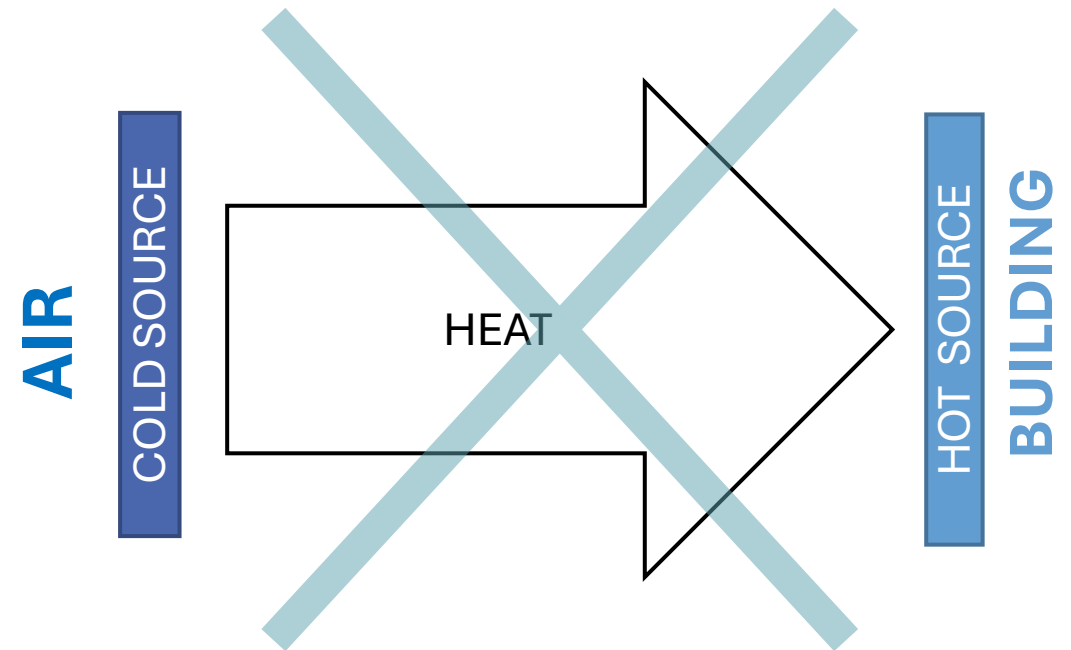
2 Geotermia de baja temperatura



2 Geotermia de baja temperatura

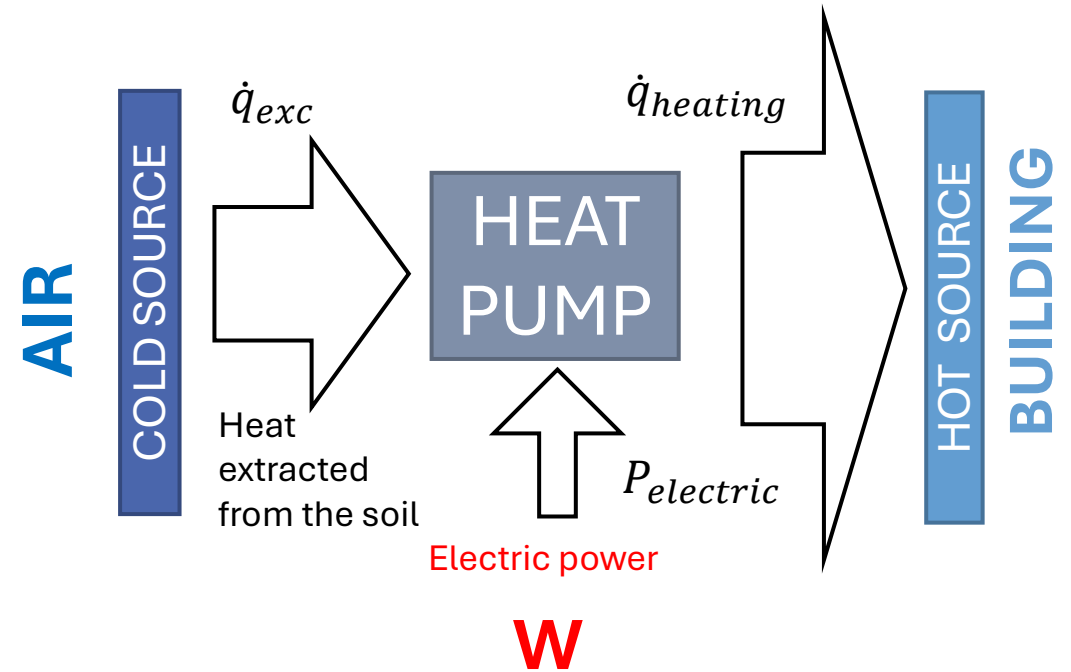
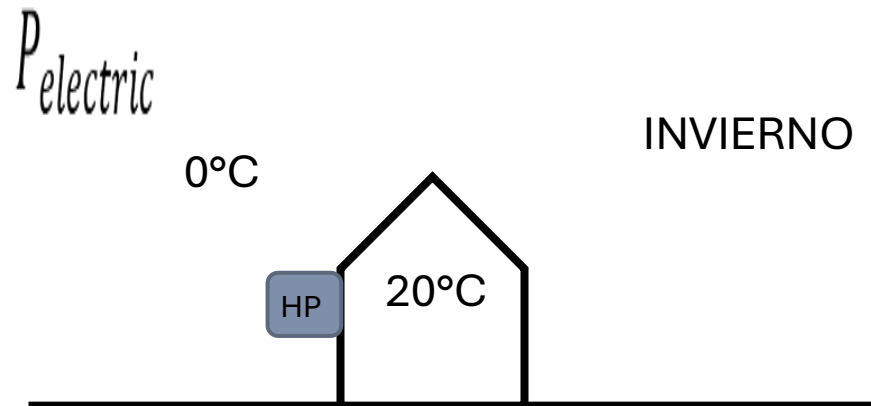


A very unlikely event.
Steinberg. The New Yorker Magazine. Inc. 1963



Segundo Principio de
la Termodinámica

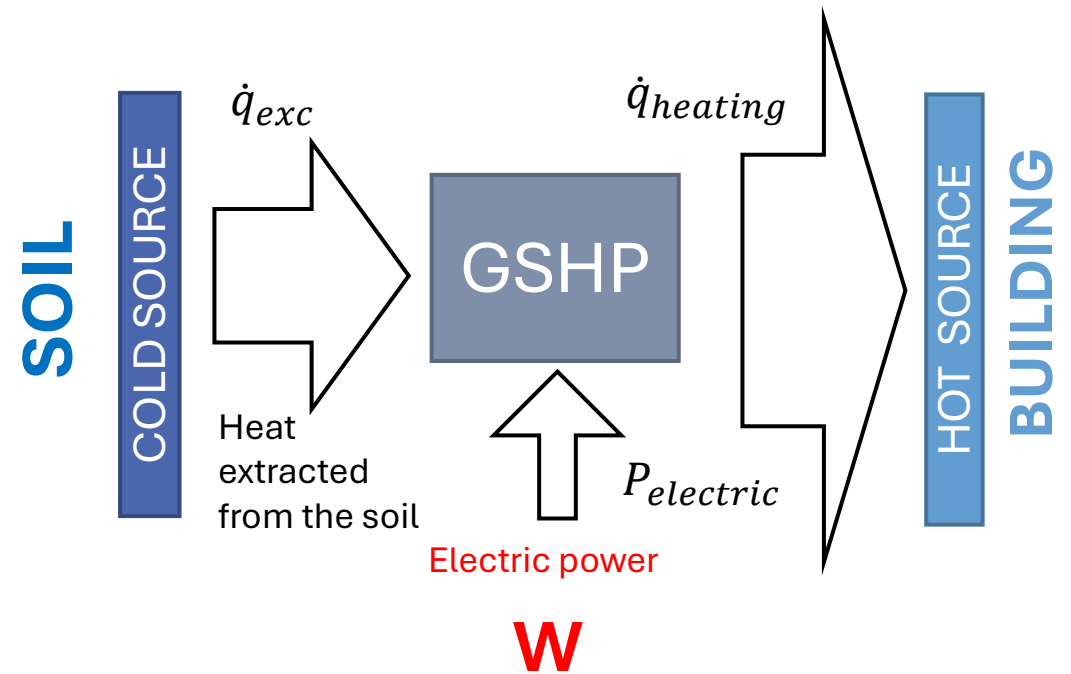
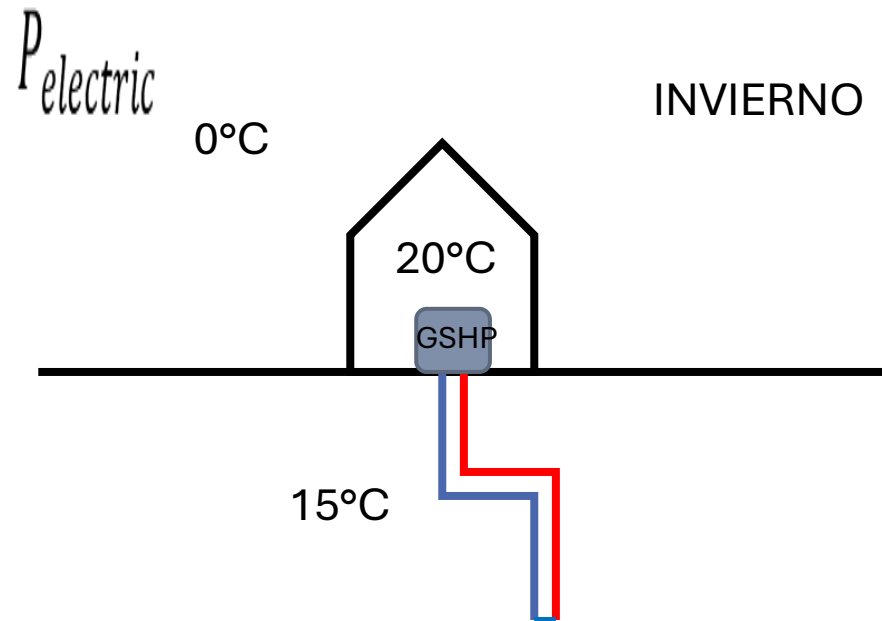
2 Geotermia de baja temperatura



$$CoP = \frac{\dot{q}_{heating}}{P_{electric}}$$

COP = 3 → 26.7 kW de potencia de calefacción
= intercambian 18 kW con el aire

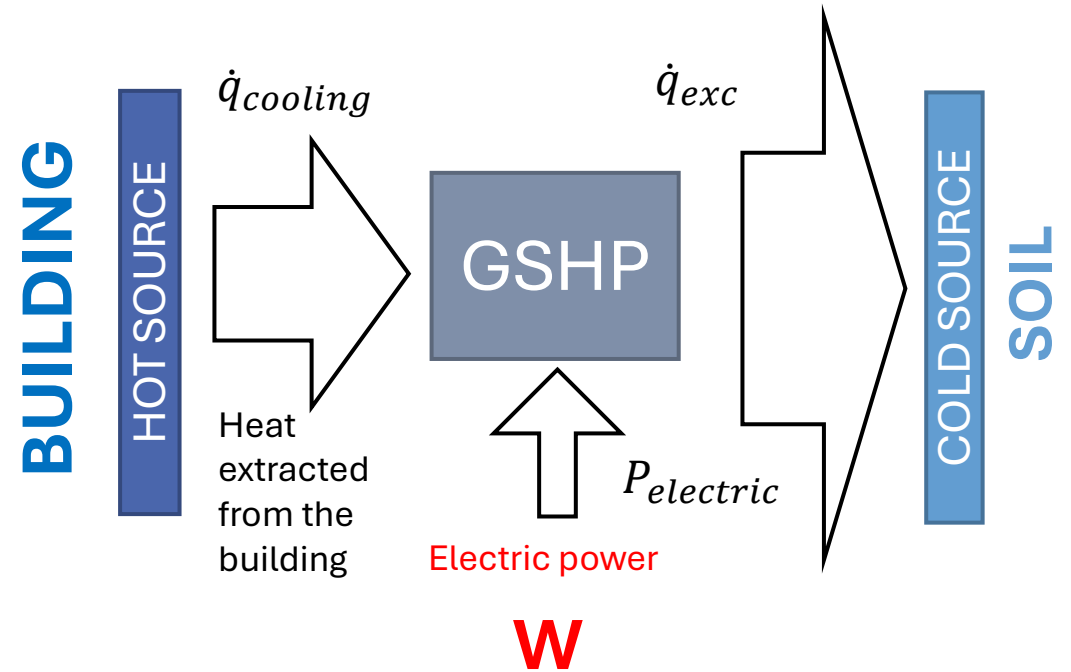
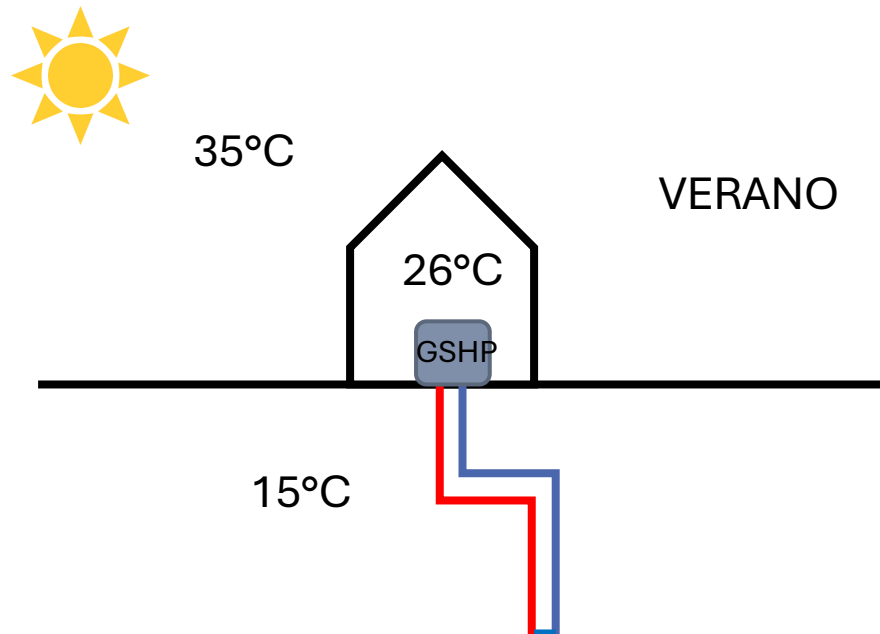
2 Geotermia de baja temperatura



$$CoP = \frac{\dot{q}_{heating}}{P_{electric}}$$

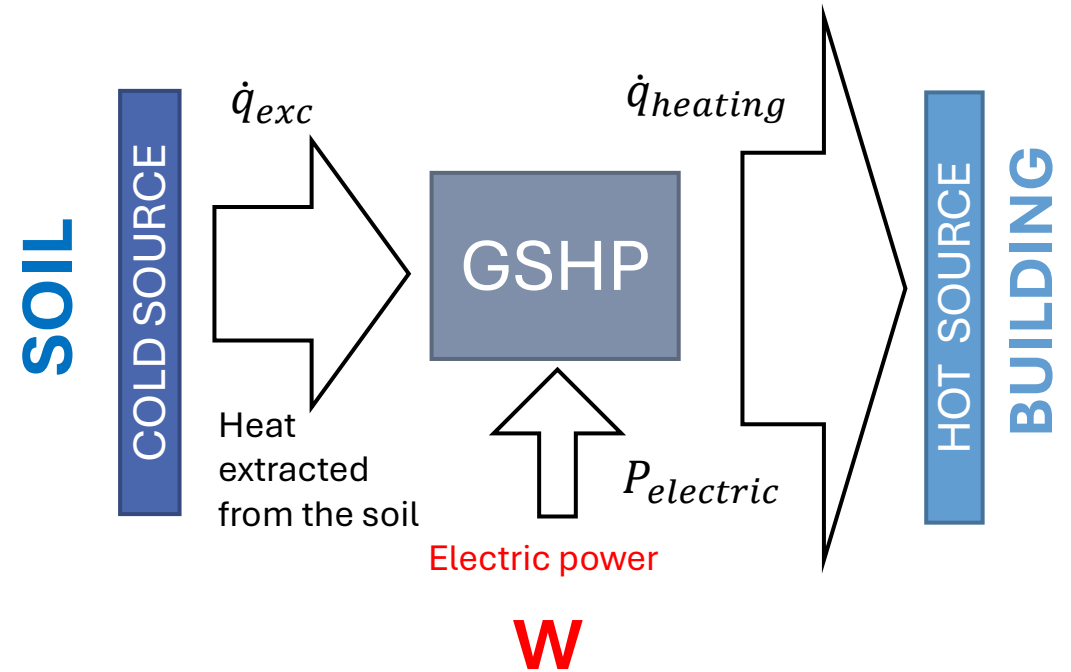
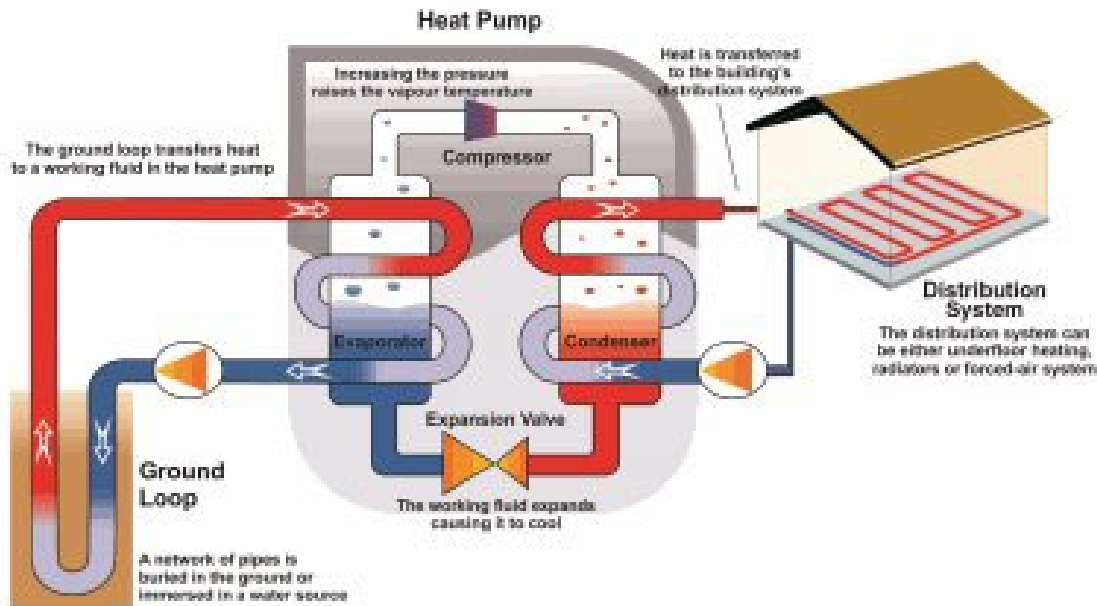
COP = 4 → 26.7 kW de potencia de calefacción
= intercambian 20 kW con el suelo

2 Geotermia de baja temperatura

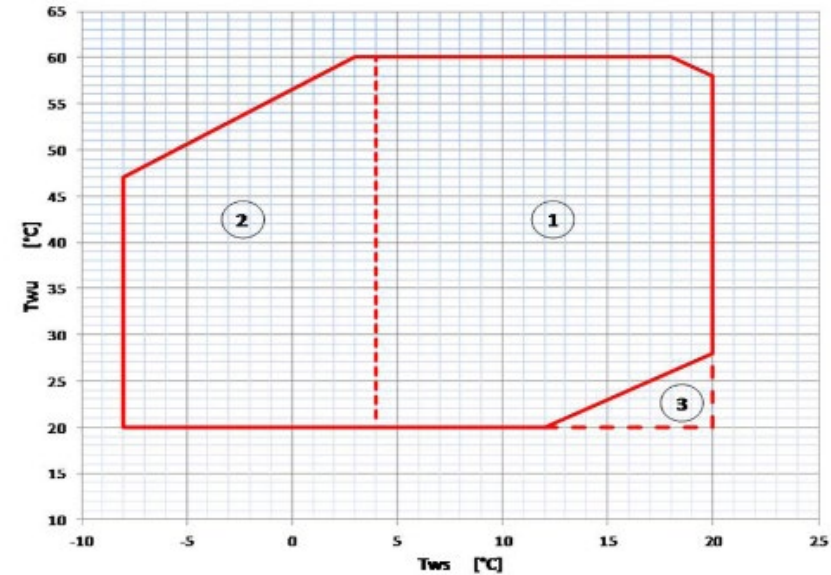
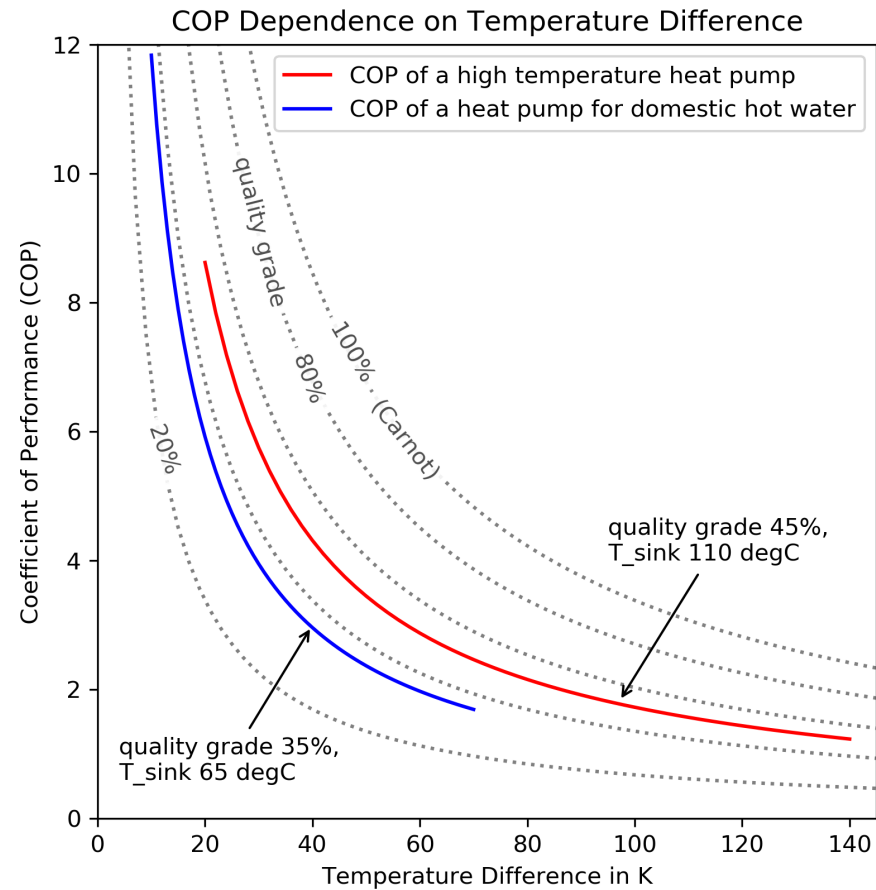


COP = 4 → 16 kW de potencia de refrigeración = intercambian 20 kW con el suelo

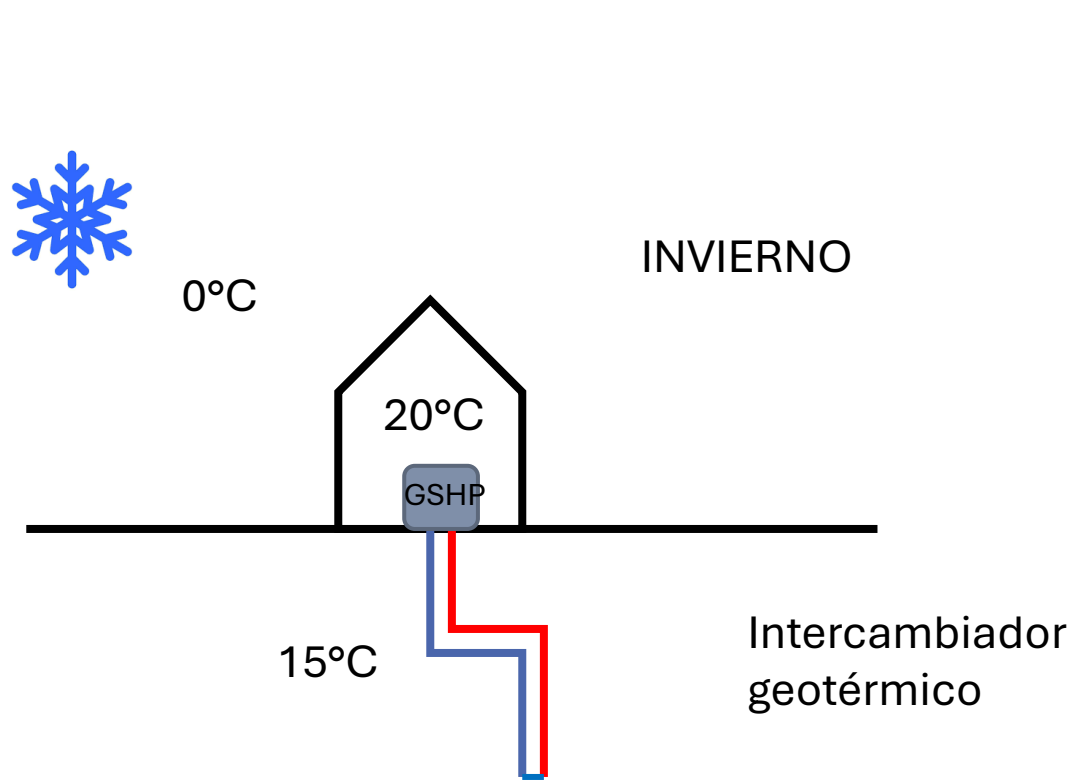
2 Geotermia de baja temperatura



2 Geotermia de baja temperatura

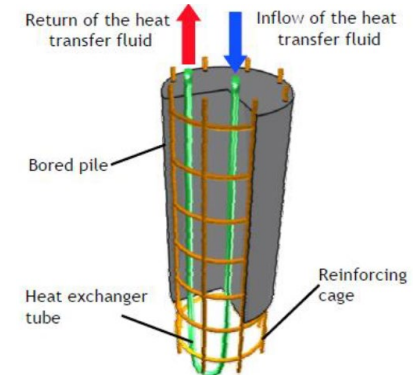
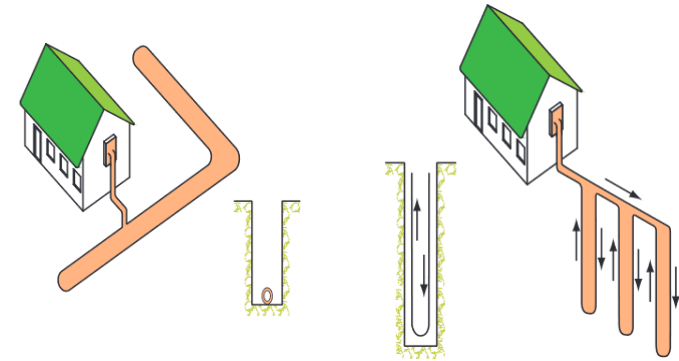


2 Geotermia de baja temperatura



Ad hoc

Cimentaciones, sostenimientos, muros



2 Geotermia de baja temperatura



- Alto rendimiento
- Climatización 100% eléctrica
- Atemperación del entorno

- Barreras financieras (inversión inicial alta)
- Necesidad de colaboración entre múltiples actores
- Barreras legales
- Dificultades en la ejecución
- Desconfianza (falta de casos de aplicación, malas experiencias)





3. Cimentaciones termoactivas

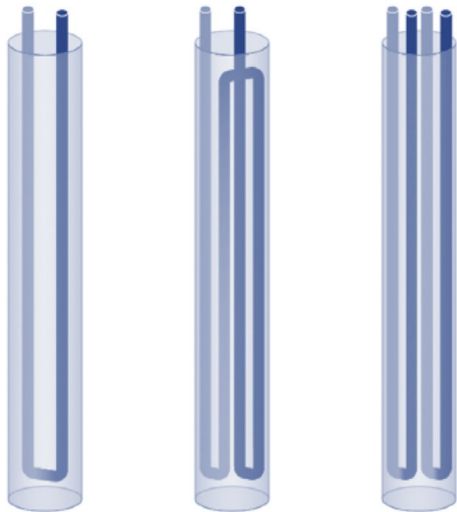
3 Cimentaciones termoactivas



FUNCIÓN ESTRUCTURAL



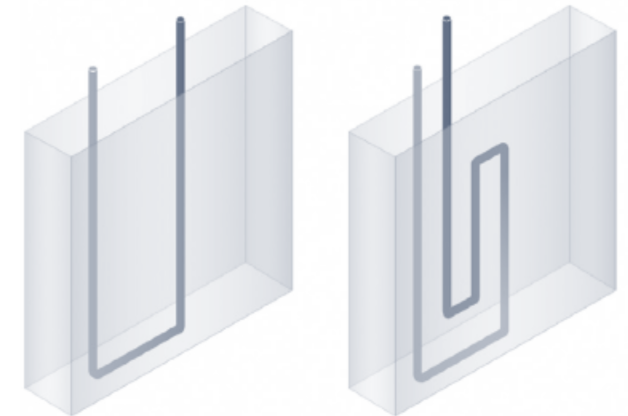
INTERCAMBIADOR DE CALOR



Pilotes



Sostenimientos

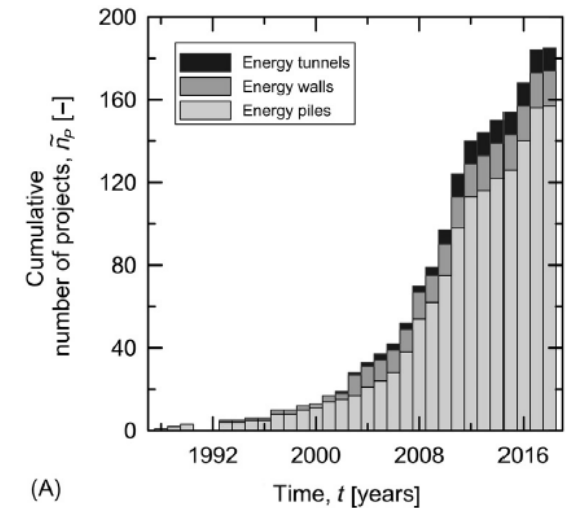


Pantallas

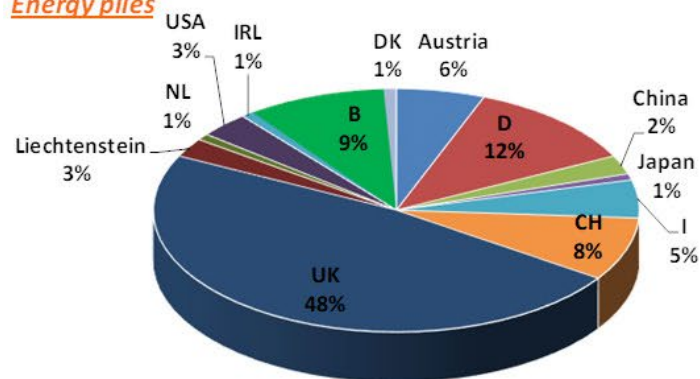
3 Cimentaciones termoactivas



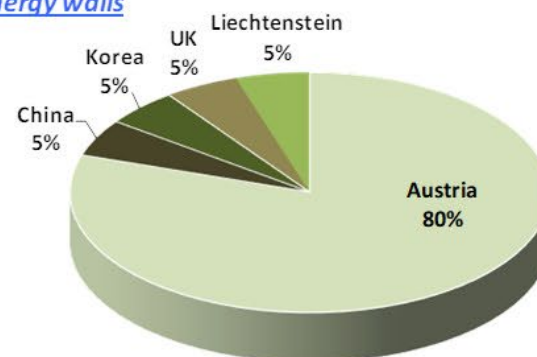
- Desde los años 1980s
- Austria, Suiza, Alemania, Reino Unido



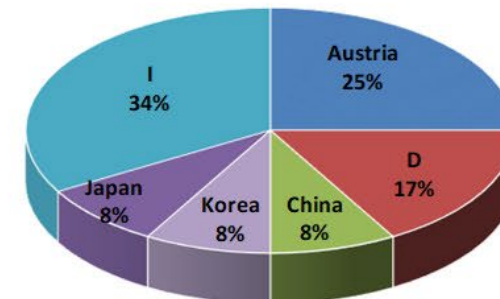
Energy piles



Energy walls



Energy tunnels

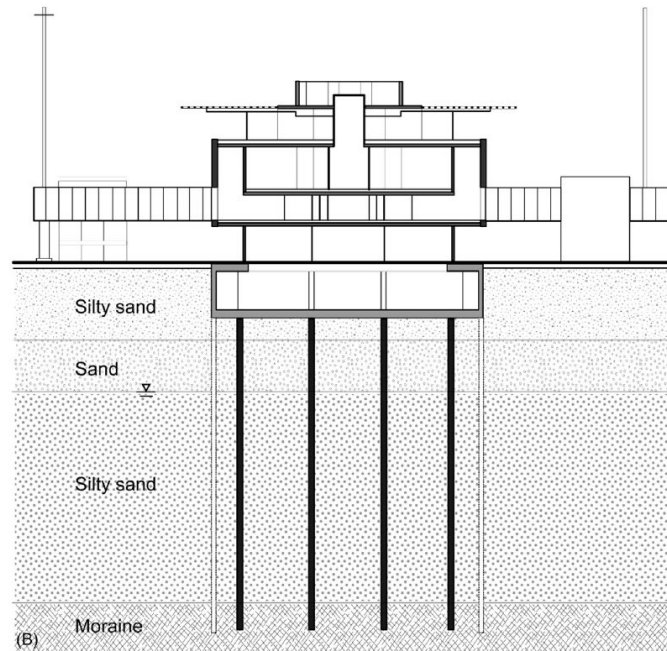


3 Cimentaciones termoactivas



Terminal E Zürich

- 300 pilotes de 30 m
- 2700 MWh / año
- ↓ 70 % calefacción
- ↓ 53% climatización
- Retorno en 8 años.



3 Cimentaciones termoactivas



Keble College, Oxford, UK

- Muros con pantalla de 223 pilotes secantes, de entre 9 y 15 m
- 61 pilotes de 12 m
- 85 kW (calor) / 65 kW (frío)



3 Cimentaciones termoactivas



Main Tower, Frankfurt, DE

- Muros pantalla de 110 pilotes de 30 m
- 112 pilotes de 30 m
- 500 kW (calor)

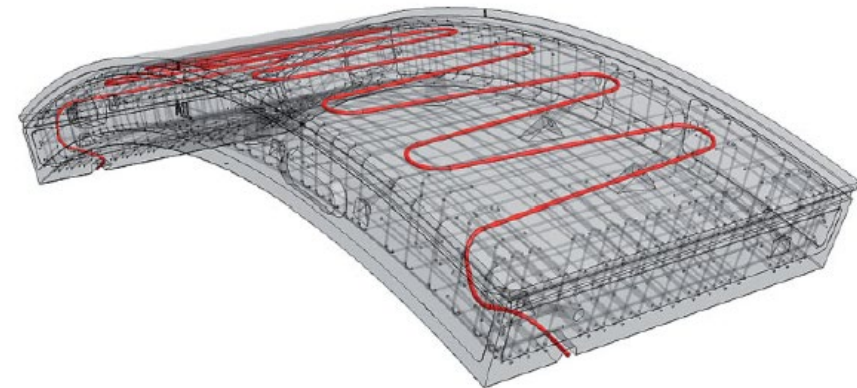
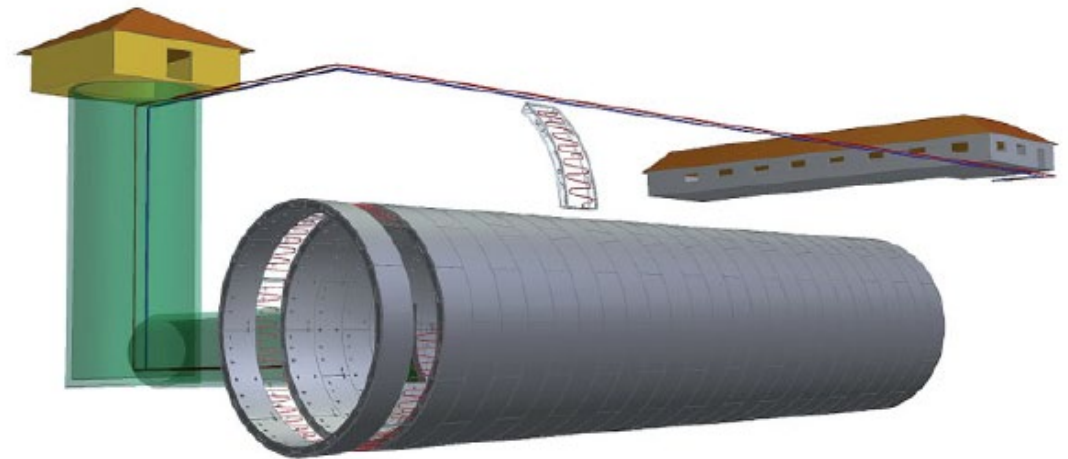


3 Cimentaciones termoactivas



Túnel Jenbach, Austria

- Túnel de 3470 m
- Sección circular (TBM)
- 56 m termoactivos (26 anillos)

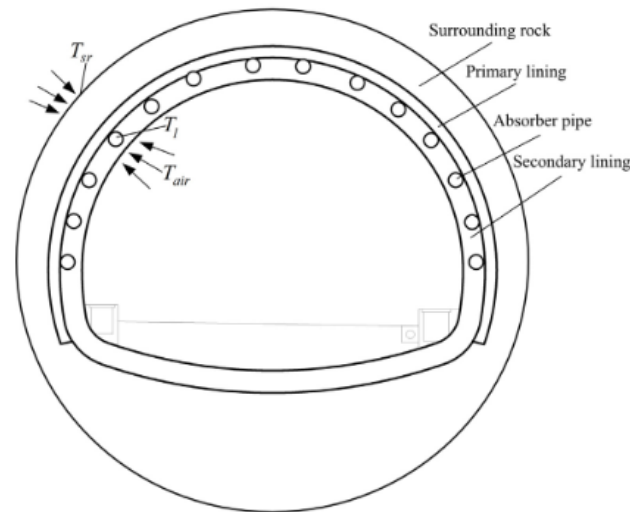


3 Cimentaciones termoactivas



Túnel de Linchang, China

- Túnel de 2515 m
- NATM
- 200 m de revestimiento termoactivo



3 Cimentaciones termoactivas



Túnel de Stuttgart-Fasanehof, DE

- Túnel de 380 m
- 20 m de revestimiento termoactivo

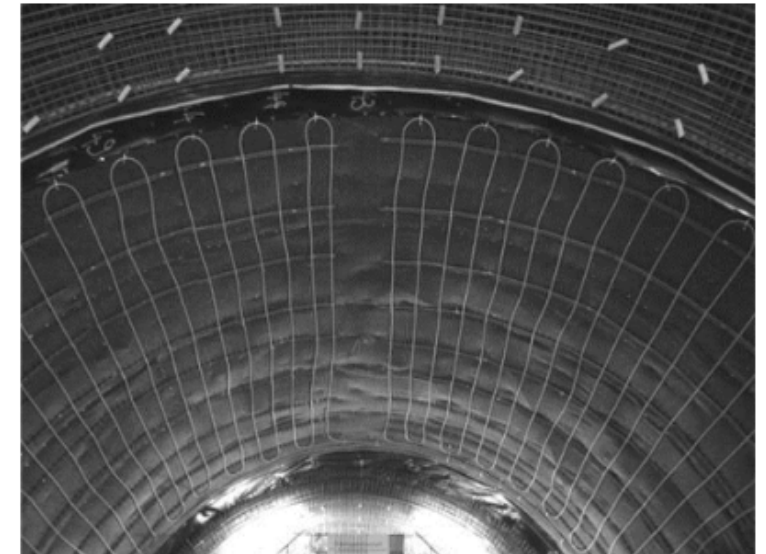
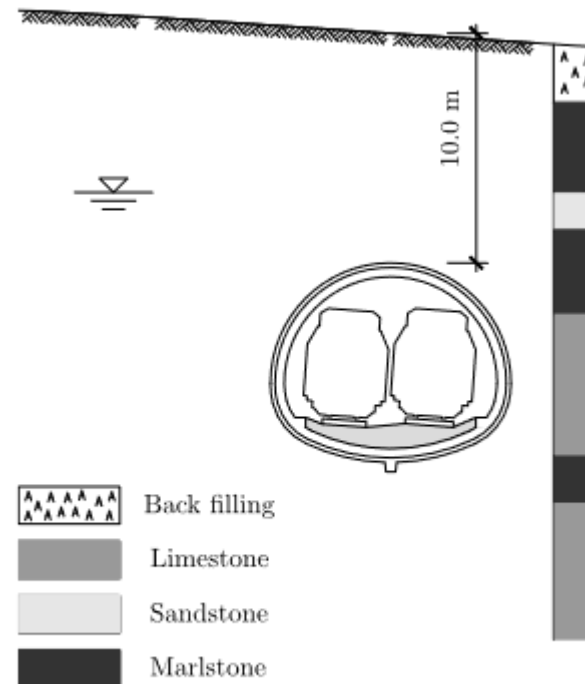


Fig. 2. Subsoil conditions.

3 Cimentaciones termoactivas



Túnel L1 Turín, Italia

- Prototipo
- Túnel de 13400 m
- 2 anillos de dovelas (2.8 m)





4. Valoración del recurso geotérmico

4 Valoración del recurso geotérmico



Objetivo general

Aprovechar al máximo la energía geotérmica sin agotar el recurso

Objetivo específico

Dimensionar circuitos hidráulicos y bombas de calor

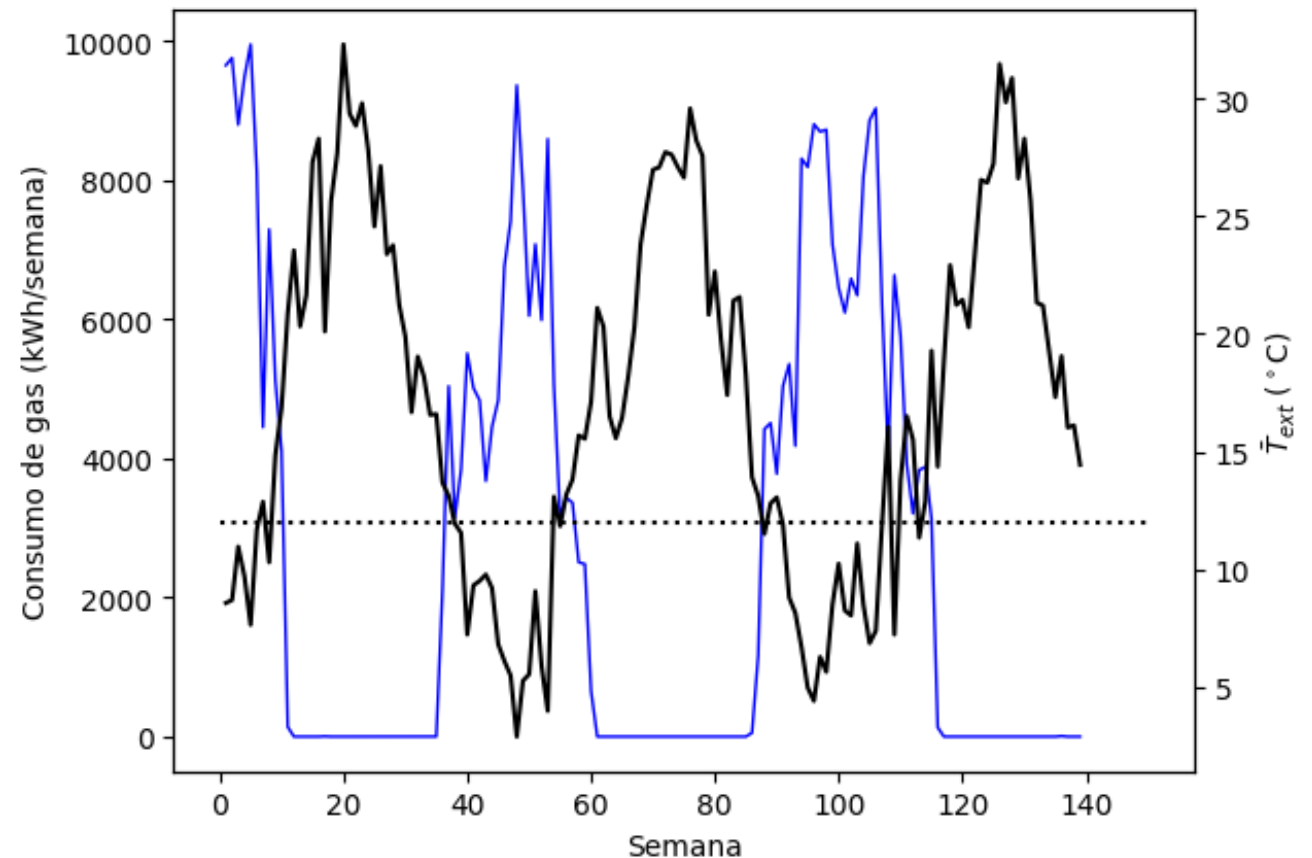
- Potencia de calefacción \neq potencia de calor intercambiado
- Demanda variable
- Gran inercia térmica

4 Valoración del recurso geotérmico



Biblioteca Municipal Ángel González

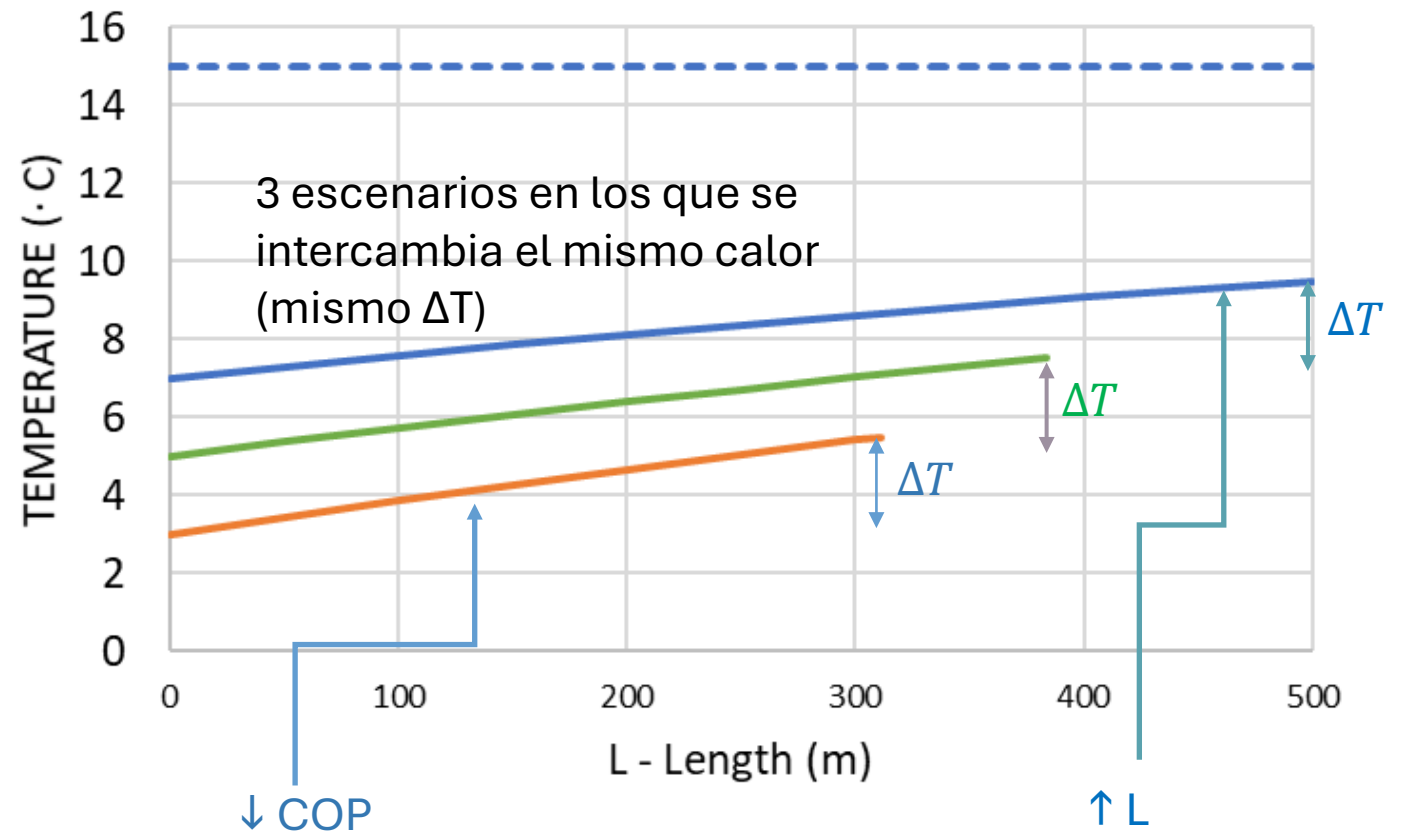
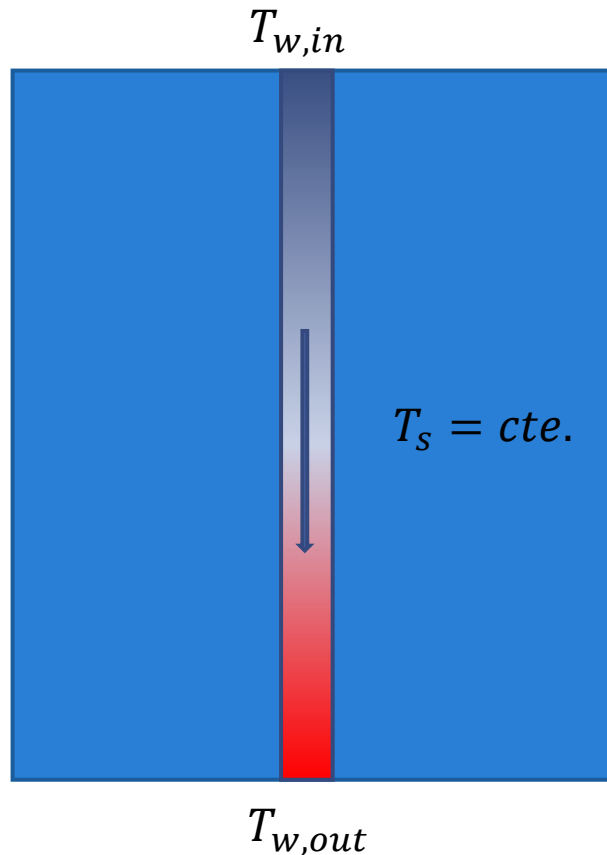
- 2,800 m²
- Calefacción: 430 kW (150 W/m²)
- Refrigeración: 100 kW (35 W/m²)
- Factor de uso calefacción: 0.08
- Factor de uso refrigeración: 0.11



4 Valoración del recurso geotérmico



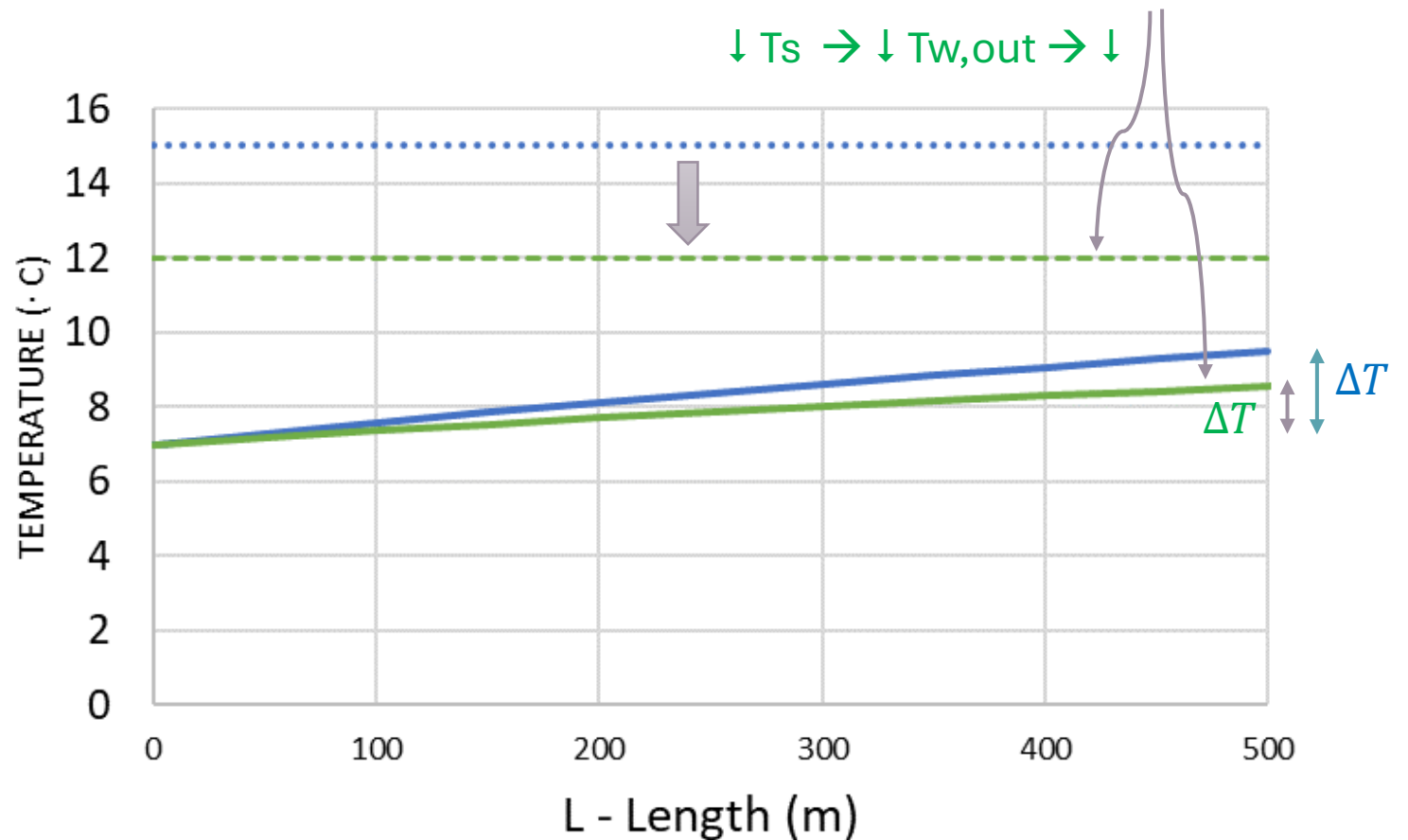
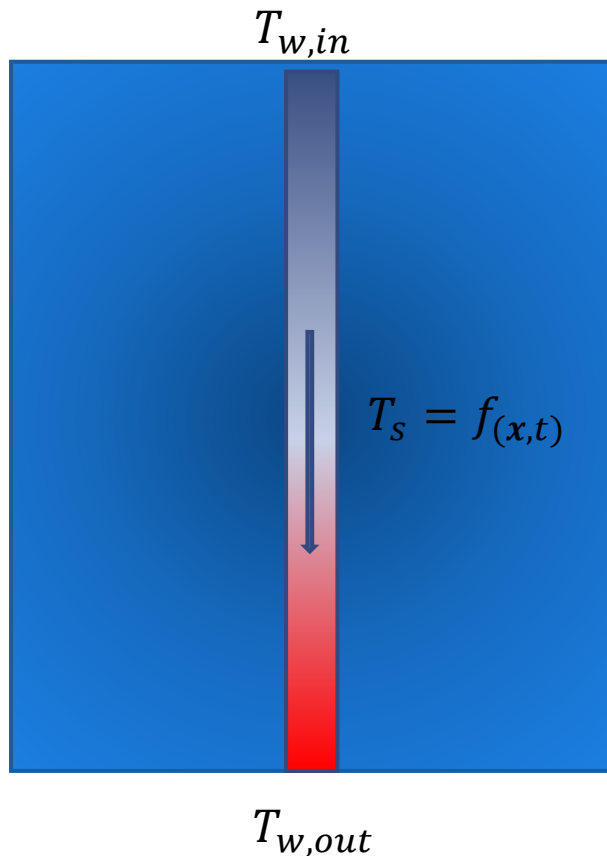
El circuito hidráulico tiene que conseguir dar un **salto térmico** a un **caudal de diseño** para poder alimentar a la bomba trabajando a una **cierta temperatura** (especificaciones técnicas).



4 Valoración del recurso geotérmico



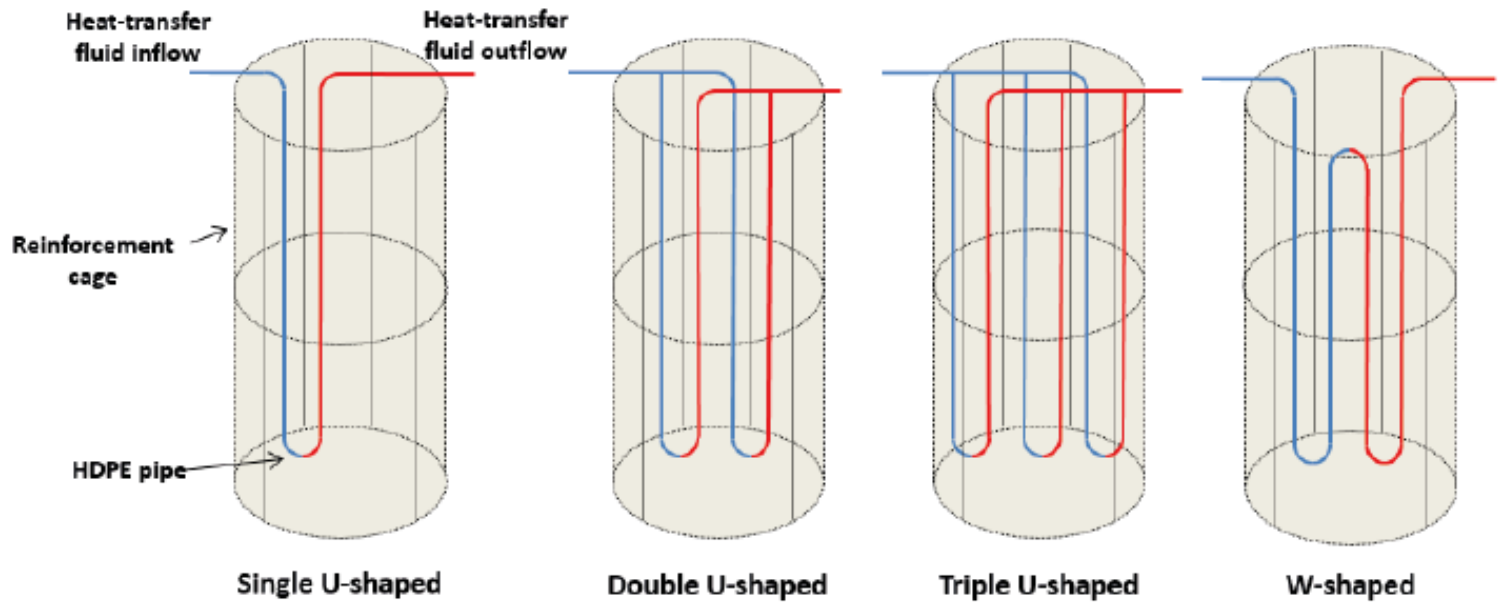
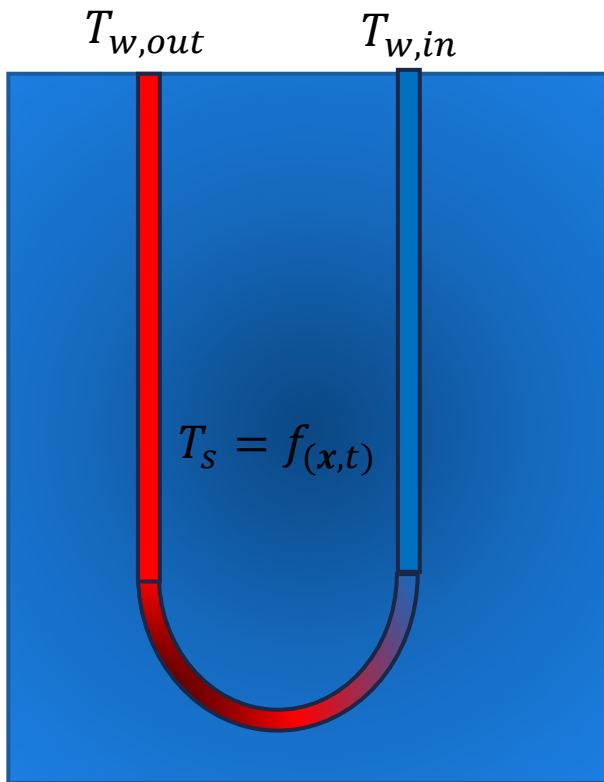
La temperatura del suelo no es constante...



4 Valoración del recurso geotérmico



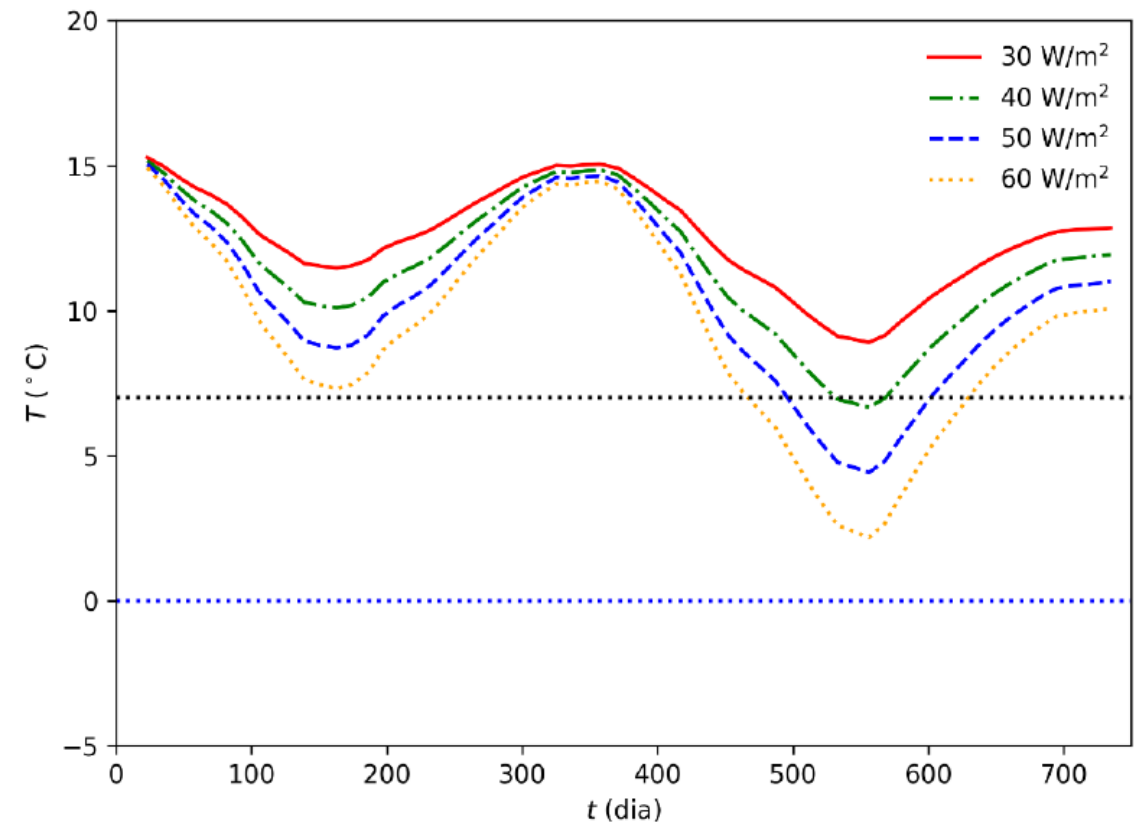
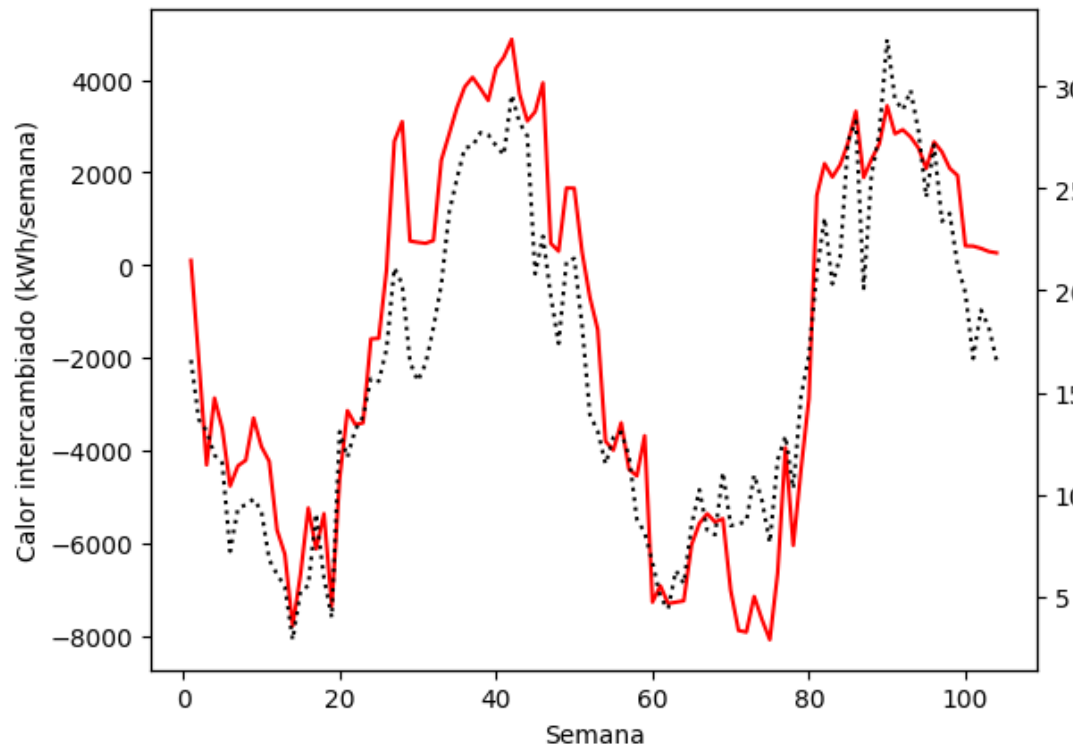
Puede haber interacciones cruzadas...



4 Valoración del recurso geotérmico



Las variaciones de temperatura se mantienen interanualmente...



4 Valoración del recurso geotérmico



Nivel 0	Valores de referencia
Nivel 1	Resistencia térmica equivalente (analíticos)
Nivel 2	Modelado numérico (fluido implícito)
Nivel 3	Modelado numérico (explícito)

4 Valoración del recurso geotérmico



VALORES DE REFERENCIA (e.g. Brandl, 2006)

- ✓ Pilotes termoactivos $D=0.3 - 0.5$ m: **40 – 60 W/m**
- ✓ Pilotes termoactivos $D \geq 0.6$ m: **35 W/ m²** (área de contacto)
- ✓ Muros pantalla, pantallas de pilotes: **30 W/m²** (área de contacto)
- ✓ Losas de cimentación: **10-30 W/m²** (área de contacto)

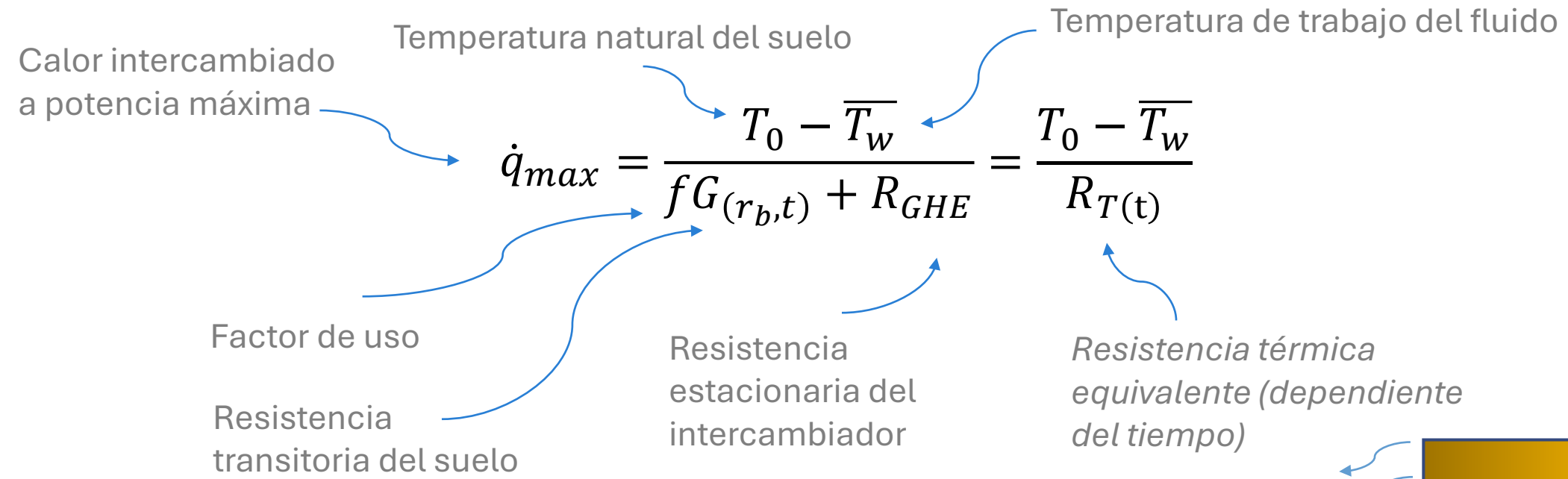
Muy fácil de usar. Orden de magnitud

Muchos aspectos no tenidos en cuenta: geología, presencia de agua, propiedades térmicas del suelo, clima local, dimensiones, patrones de uso, diseño del intercambiador, equilibrio entre demandas de frío y calor

4 Valoración del recurso geotérmico

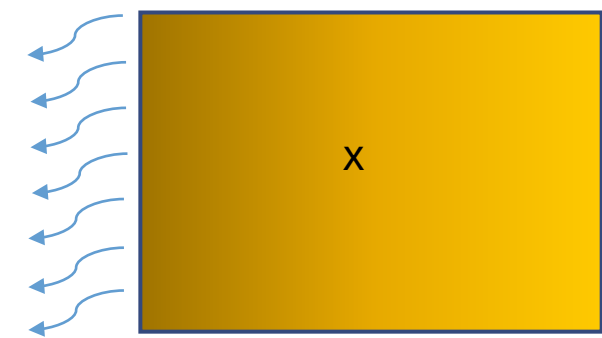


RESISTENCIA TÉRMICA EQUIVALENTE



Soluciones analíticas

$$G_{(r_b,t)} = \left(-\ln \left(\frac{r_b^2}{4\alpha_s t} \right) - \gamma \right)$$



4 Valoración del recurso geotérmico



RESISTENCIA TÉRMICA EQUIVALENTE

$$\dot{q}_{max} = \frac{T_0 - \overline{T_w}}{fG_{(r_b,t)} + R_{GHE}} = \frac{T_0 - \overline{T_w}}{R_{T(t)}}$$

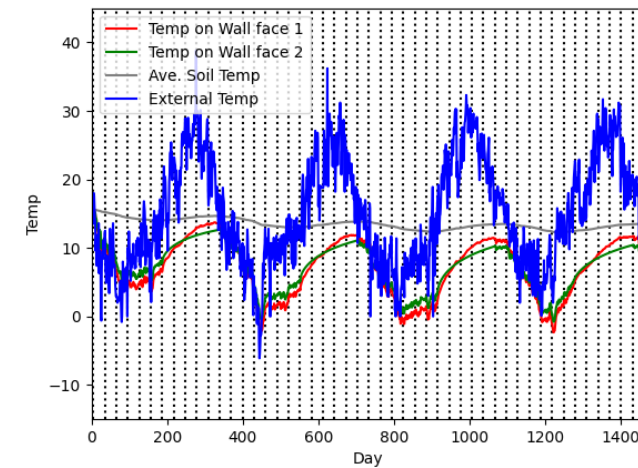
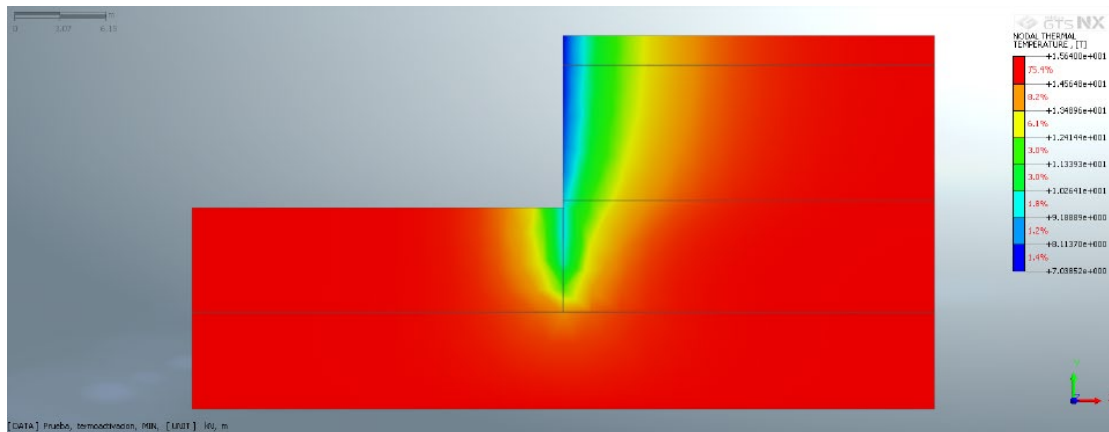
Analítico. Tiene en cuenta factor de uso y propiedades del suelo y cuantificar la influencia de la Resistencia térmica del intercambiador

No permite evaluar el balance interanual, geometría muy simplificada

4 Valoración del recurso geotérmico



MODELOS NUMÉRICOS (fluido implícito)



Tiene en cuenta factor de uso y patrones de uso, propiedades del suelo, geometrías, variación interestacional

Más complicado

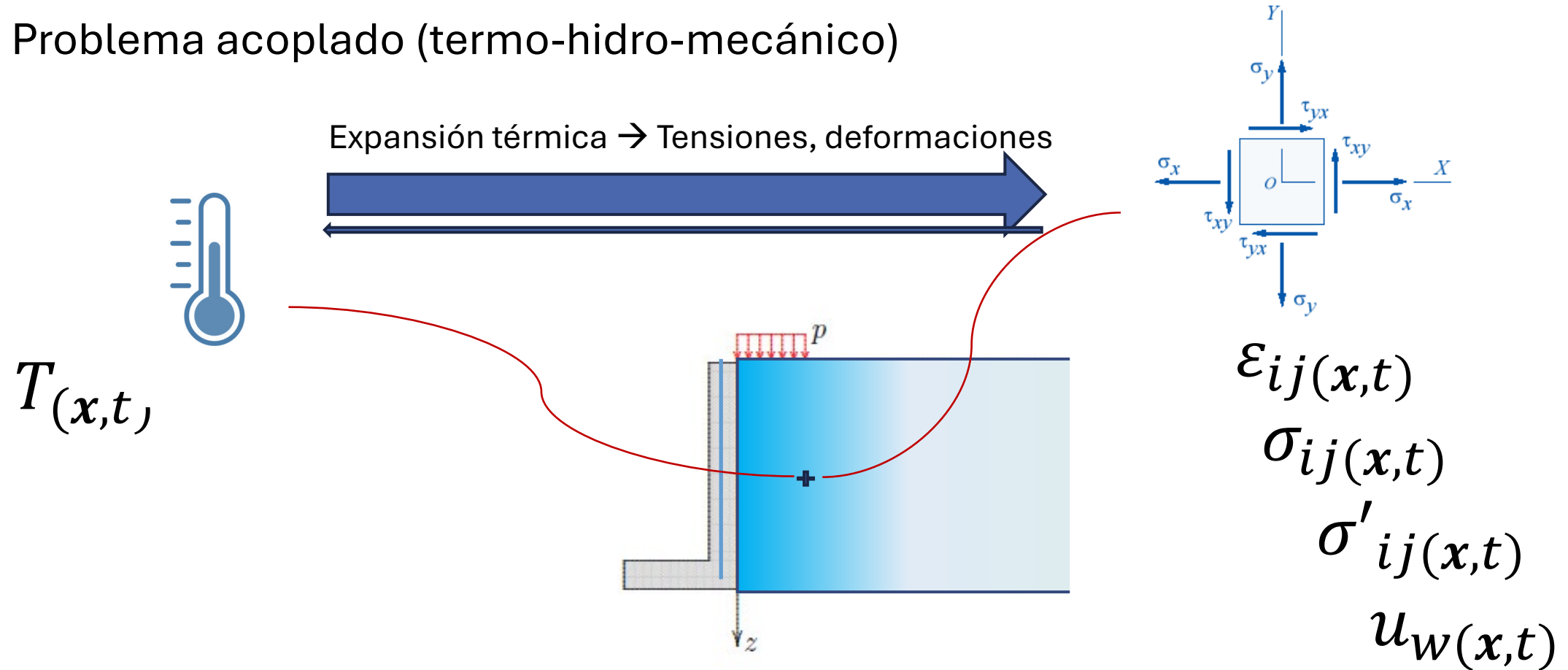


5. Valoración del efecto estructural

5. Valoración del efecto estructural



Problema acoplado (termo-hidro-mecánico)



5. Valoración del efecto estructural

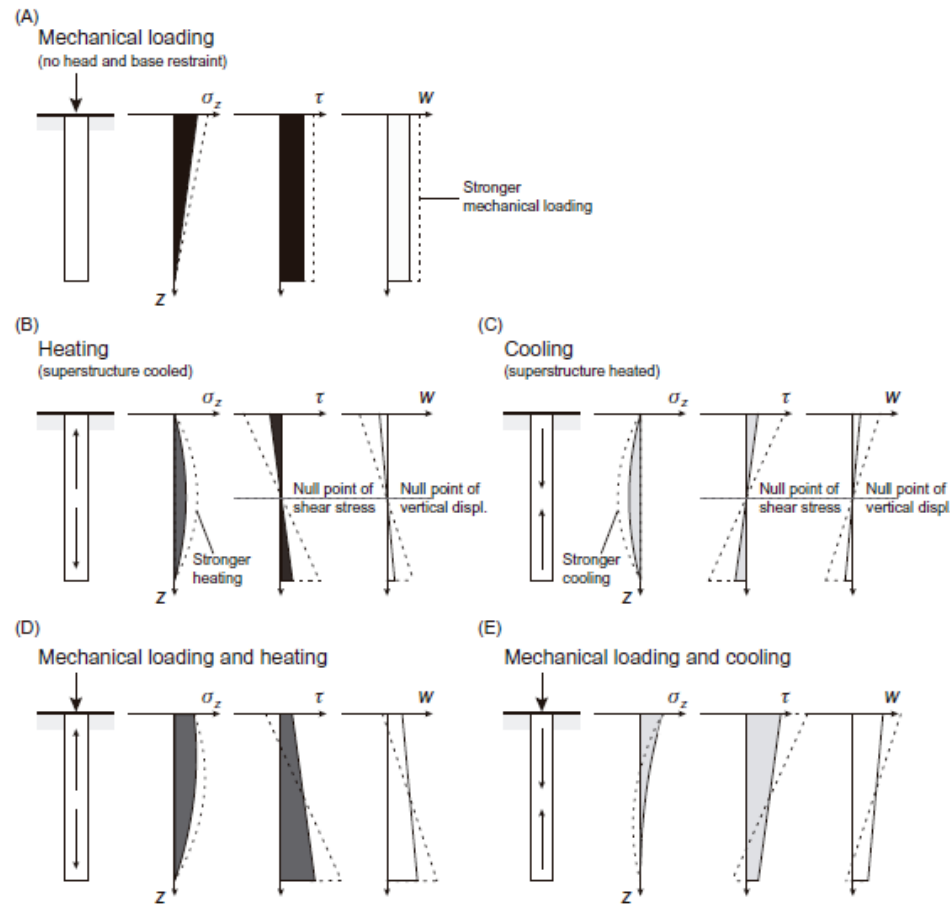


Figure 10.19 Thermomechanical schemes for energy piles characterised by no base and head restraints (Rotta Loria and Laloui, 2018b).

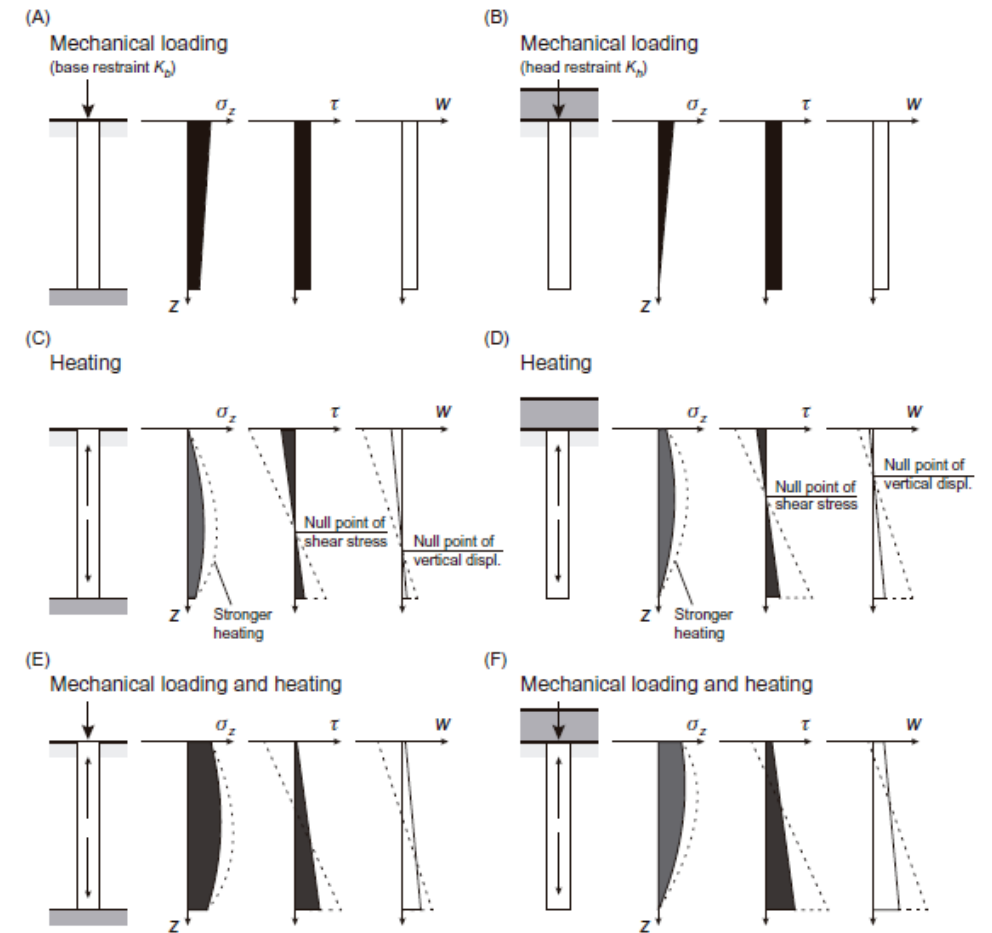
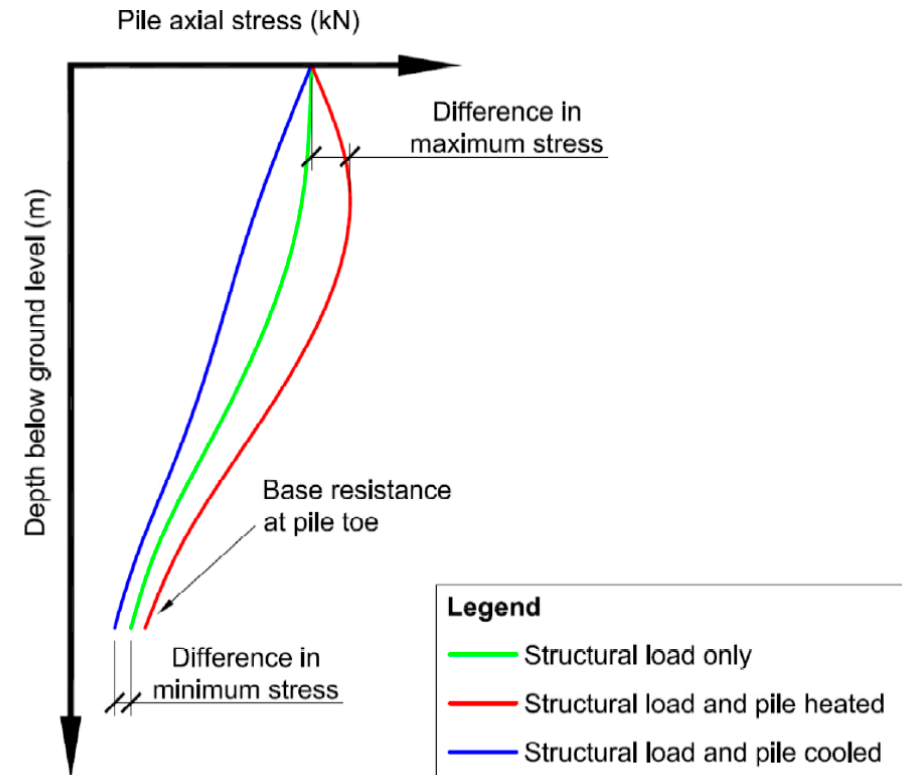
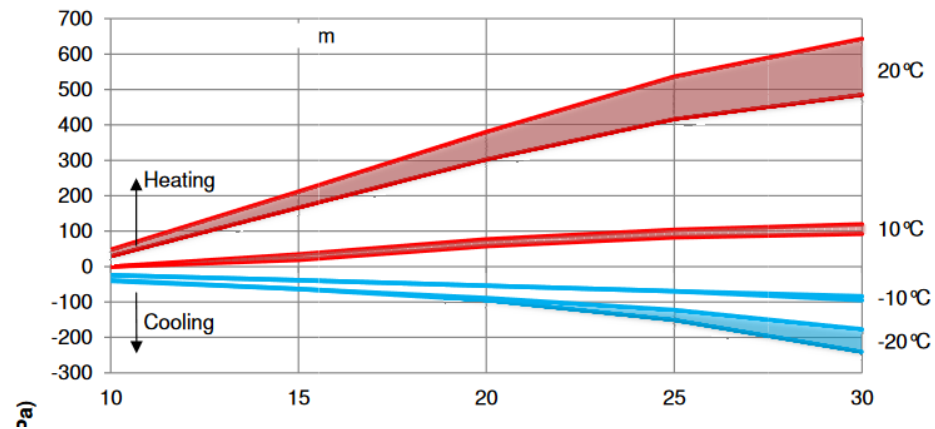
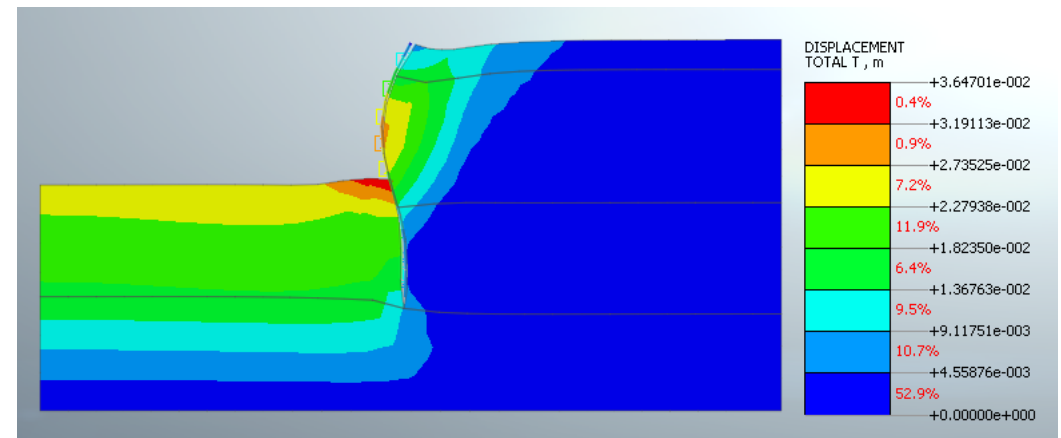
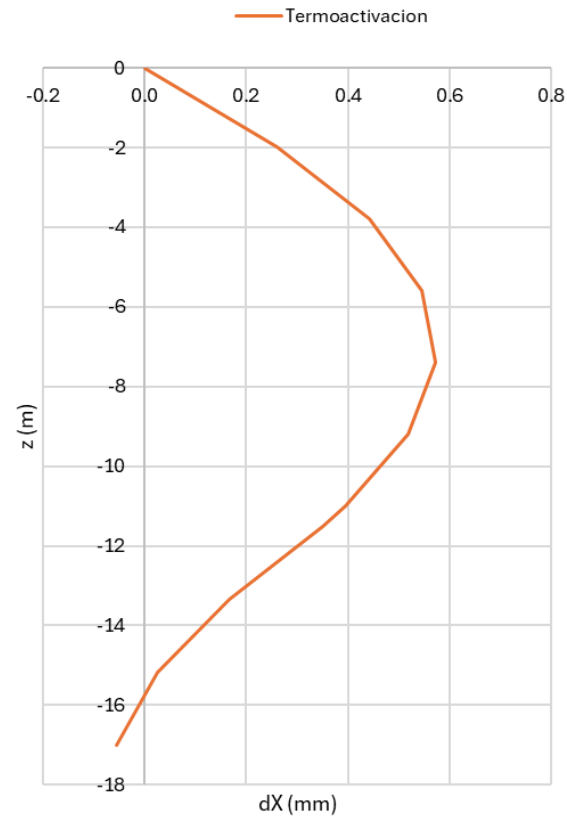
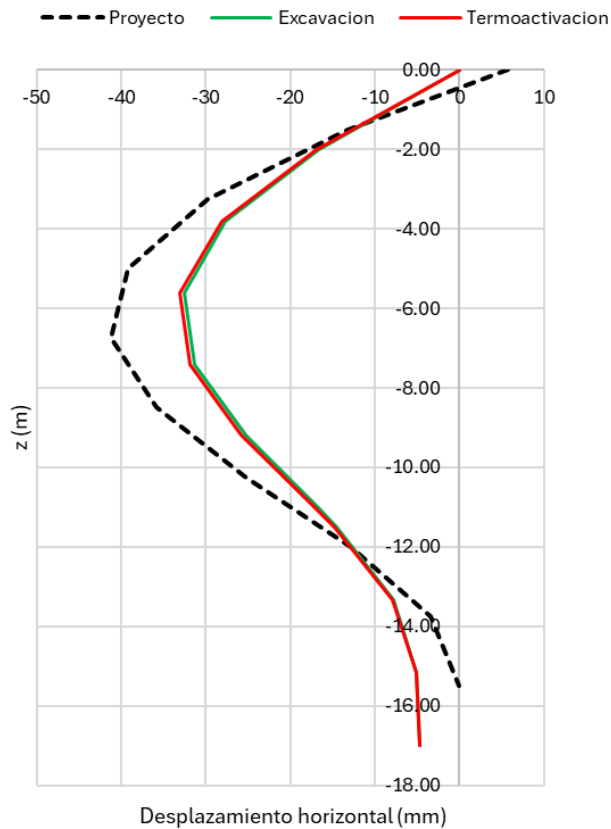


Figure 10.20 Thermomechanical schemes for energy piles characterised by base or head restraints (Rotta Loria and Laloui, 2018b).

5. Valoración del efecto estructural



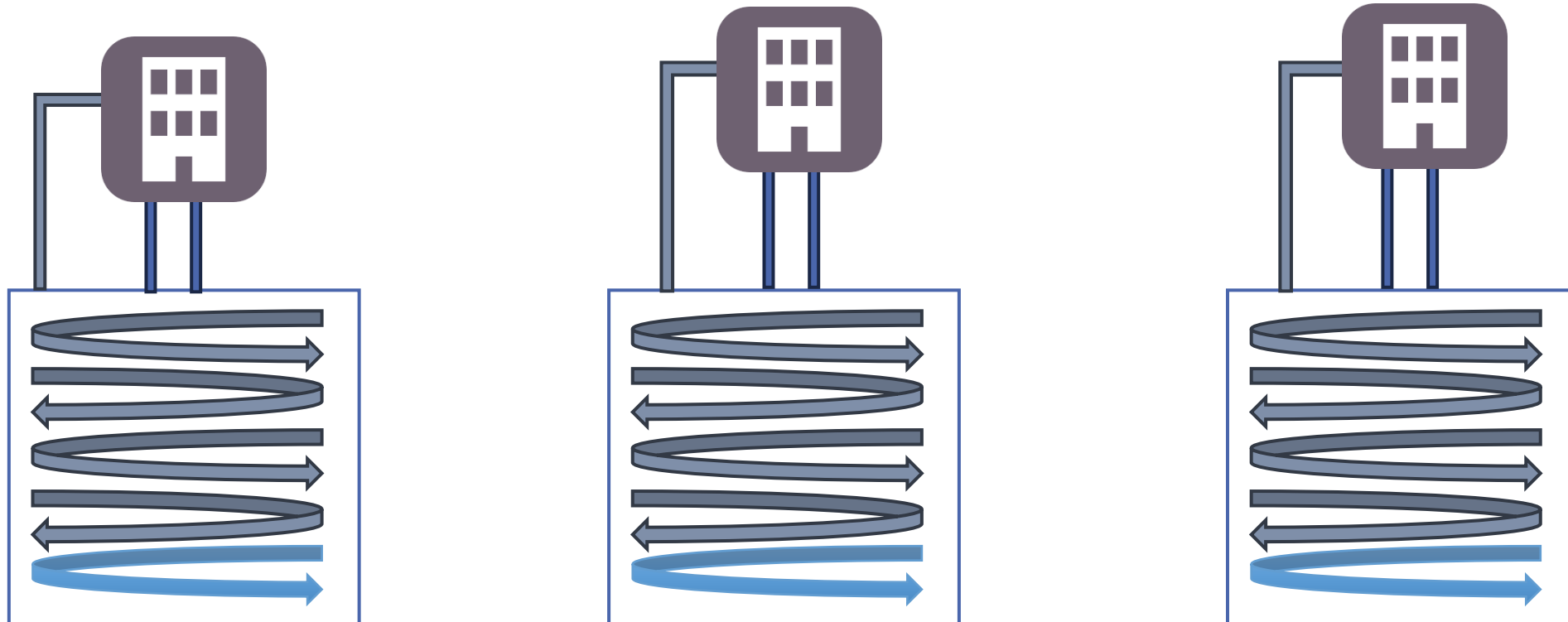
5. Valoración del efecto estructural



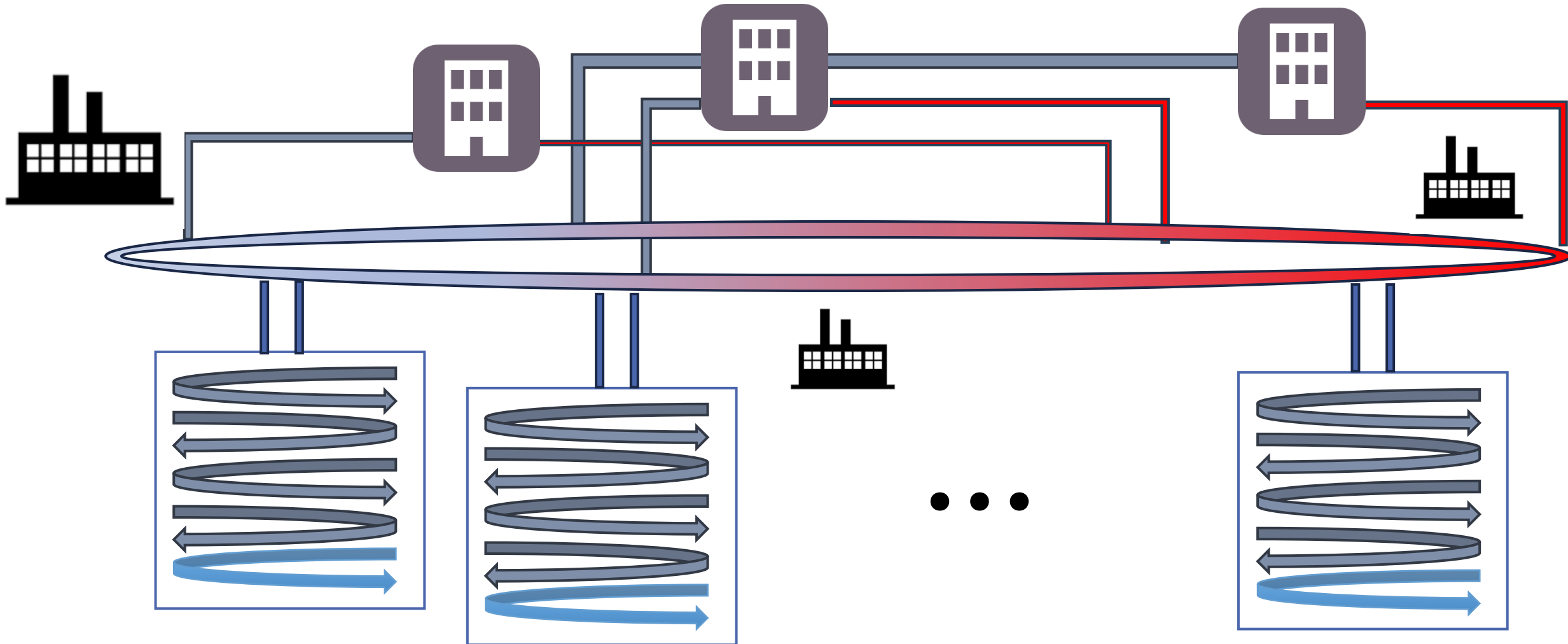


6. Cimentaciones termoactivas y redes de calor y frío

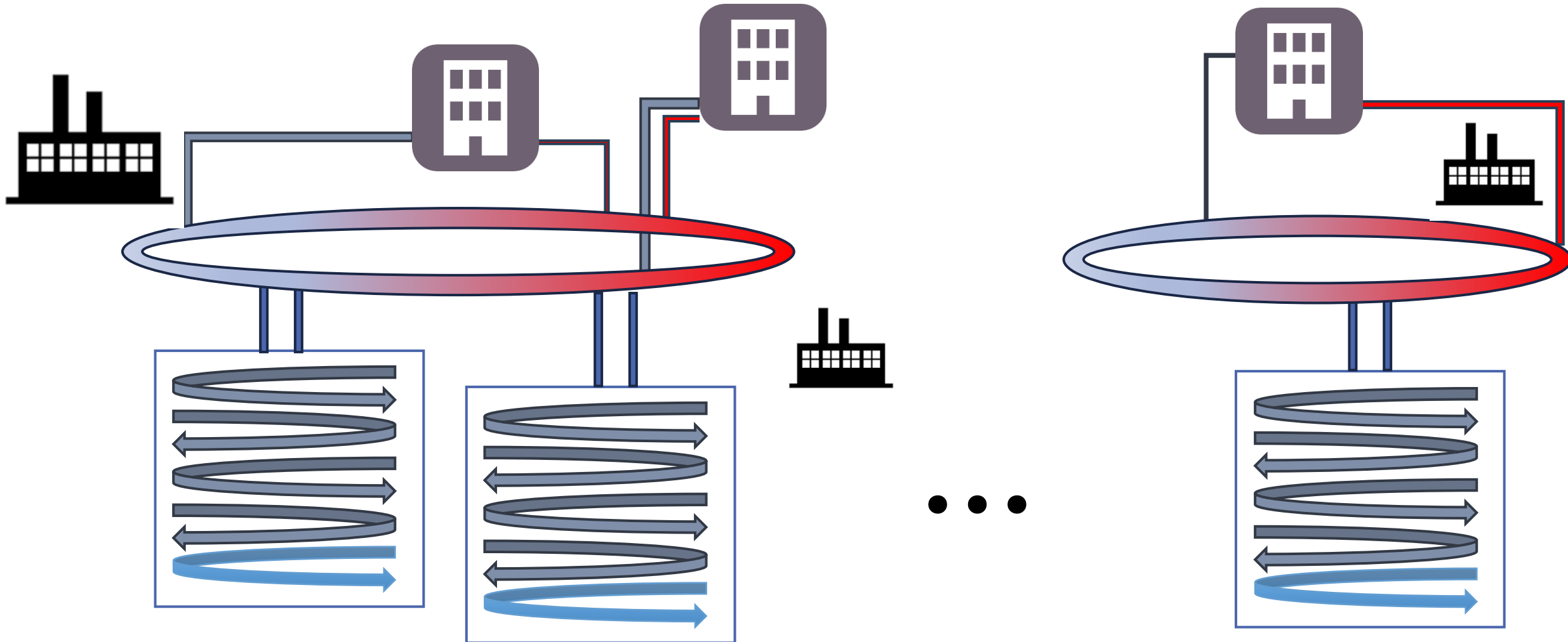
6. Cimentaciones termoactivas y redes de calor y frío



6. Cimentaciones termoactivas y redes de calor y frío



6. Cimentaciones termoactivas y redes de calor y frío





7. Conclusiones

7. Conclusiones



1. La termoactivación de cimentaciones es una gran oportunidad para el ahorro energético, la decarbonización y la mitigación del efecto isla de calor
2. Las implicaciones estructurales pueden ser irrelevantes en muchos casos
3. El recurso geotérmico es generoso pero un tanto peculiar
4. Las redes de calor y la explotación inteligente pueden marcar la diferencia
5. Los retos no son solo tecnológicos



Muchas gracias por su atención.