

3. Modelado matemático y dimensionado de captadores

3.1. Criterios de dimensionado

El dimensionado de una instalación geotérmica depende de muchos y muy diferentes factores. Los más determinantes, que son los que determinan los equipos (tanto en una instalación geotérmica como en una convencional) son las cargas térmicas y la bomba de calor principalmente, así como el clima, que puede hacer variar las condiciones de operación de la bomba.

Debido al incremento sustancial de los costes de instalación en una instalación geotérmica, éste se convierte en un parámetro no determinante pero si muy influyente.

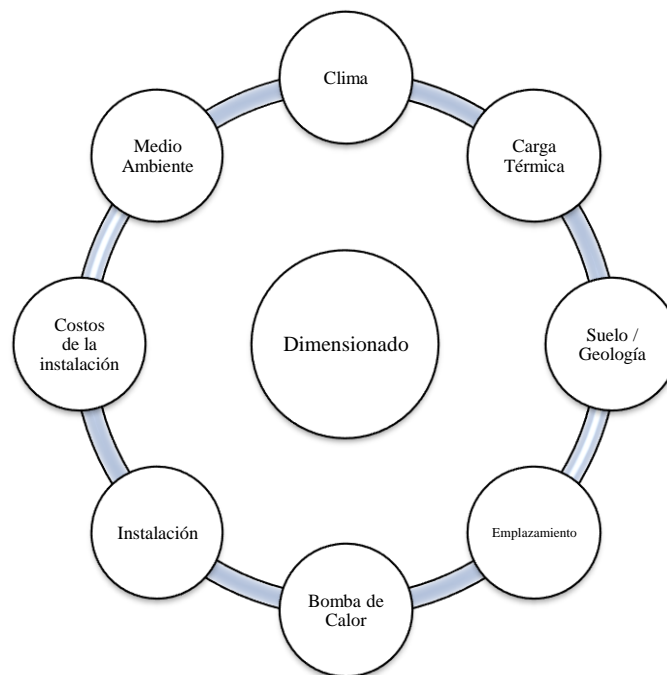


Figura 3.1. Criterios de dimensionado.

El suelo y el emplazamiento van estrechamente ligados, ya que la decisión por un emplazamiento u otro depende directamente del suelo del que este dotado. La selección del emplazamiento también depende directamente del clima.

El tipo de instalación se debe fijar para así poder realizar cálculos, además puede hacer variar los costes de instalación ya que un sistema horizontal (debido a que los movimientos de tierras serán menos costosos) es más barato que uno vertical.

El medio ambiente es un factor a tener en cuenta para no dañar el ecosistema y cumplir normativas al respecto.

Se puede ver en la figura 3.1 un diagrama que resume los factores a tener en cuenta.

3.2. Propiedades térmicas del suelo

Las propiedades más importantes del terreno que influyen en un sistema geotérmico de manera directa son la conductividad térmica, la resistividad térmica de las superficies de intercambio y la difusividad térmica.

La ley de Fourier explica la transferencia de calor por conducción. De esta forma, *la tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada, es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección.*

$$Q = -K \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

donde: Q es la tasa de transferencia de calor, W/m.
 ΔT es el salto térmico, K.
 K conductividad térmica, W/mK.

Otra propiedad muy importante es el calor específico (J/Kg·K), que se define como *la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa del sistema considerado para elevar su temperatura en una unidad (kelvin o grado Celsius) a partir de una temperatura dada, en general, el valor del calor específico depende de dicha temperatura inicial.*

Atendiendo a esta definición el suelo se calentará tanto más cuanto menor sea su calor específico. El suelo tiene elementos constitutivos con diferente calor específico, lo que hace que la textura del suelo juegue un papel importante en este sentido.

La humedad supone un contenido en agua del suelo. El calor específico del agua es del orden de cinco veces el calor específico de los constituyentes del suelo, por lo que el agua se calentará más lentamente que el suelo. Y como resultado de esto, un suelo con alto contenido en agua se calentará más lentamente que uno con bajo nivel de humedad.

La difusividad térmica (m^2/s) se define como el ratio entre la conductividad y el almacenamiento térmico del terreno, relacionándose con el calor específico en la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{K}{C_p \cdot \rho} \quad (3.2)$$

donde: α es la difusividad térmica, m^2/s
 K es la conductividad térmica, W/mK.
 C_p es el calor específico, J/kgK.
 ρ es la densidad del material (Kg/m^3).

Al producto de la densidad y el calor específico se le llama capacidad térmica y representa la capacidad del material para almacenar calor en condiciones de transición en su entorno.

Valores de conductividad y difusividad para suelos típicos se muestran a continuación:

Tipo de suelo	Conductividad Térmica (W/mK)	Difusividad Térmica (cm ² /s)
Arena	0,77	0,0045
Limo	1,67	-
Arcilla	1,11	0,0054
Marga	0,91	0,0049
Arena saturada	2,50	0,0093
Arcilla saturada	1,67	0,006

Tabla 3.1. Valores típicos de conductividad y difusividad.

Un valor que se debe tener en cuenta, no siendo tanto una propiedad del terreno pero si un parámetro térmico que influye directamente en un sistema geotérmico, es la resistividad térmica entre el fluido caloportador y las paredes del pozo de intercambio. Para una tasa de transferencia de calor concreta q (W/m), la diferencia de temperaturas entre el fluido caloportador y las paredes del pozo de intercambio se define como:

$$T_f - T_b = R_b \cdot q \tag{3.3}$$

- donde:
- T_f es la temperatura media de masa del fluido caloportador, K.
 - T_b es la temperatura de las paredes del pozo, K.
 - R_b es la resistividad térmica del conjunto, mK/W.
 - q es la tasa de transferencia de calor, W/m.

3.2.1. Ensayos de medida. TP02 Sonda Non steady – state para la medida de la conductividad térmica

Para la obtención de la conductividad térmica existen ensayos que permiten su cálculo, la difusividad térmica en cambio se puede calcular a partir de la conductividad.

TP02 es una sonda de alta calidad que ofrece la posibilidad de realizar una práctica y rápida medida de la conductividad térmica del medio en el que se inserta. Ésta trabaja en el marco de los estándares ASTM (American Society for Testing and Materials) D 5334-92, D 5930-97 y IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 442-1981.

El método de medida NSSP (Non-steady-state probe) [3] posee la fundamental ventaja de ser rápida y absoluta mientras las dimensiones de la muestra no sean críticas.

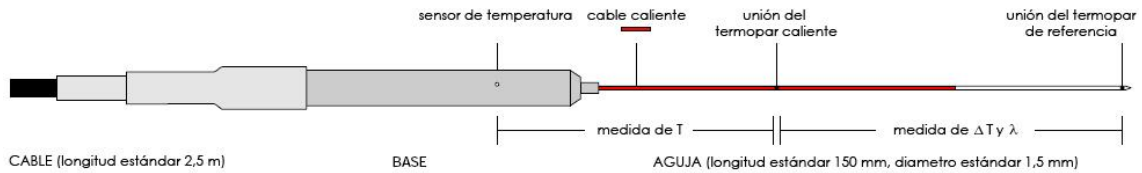


Figura 3.2. Sonda NSSP

La sonda TP02 Non-Steady-State consiste en una aguja con 2 enlaces de termopar (uno de los cuales actúa como referencia) y un cable que actúa como foco caliente. Se inserta en el medio que se investiga. En la base, se monta un sensor de temperatura. Las ventajas de este diseño: una precisión óptima independiente de la temperatura media, una sensibilidad mínima a gradientes térmicos, un sensor de alta estabilidad y la posibilidad de utilizar cables y conectores normales.

El principio del NSSP se basa en la propiedad de la línea de salida: tras un corto periodo transitorio el aumento de temperatura, ΔT , solo depende de la fuente de calor, Q , y de la conductividad térmica media, K :

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi K} \cdot (\ln(t) + B) \tag{3.4}$$

- donde:
- ΔT aumento de temperatura en periodo transitorio, K.
 - Q energía de la fuente de calor, W/m.
 - K es la conductividad térmica, W/mK.
 - t tiempo, s.
 - B constante.

En base a esto la conductividad térmica puede ser calculada midiendo la fuente de calor y siguiendo la evolución de la temperatura en función del tiempo (2 minutos en un ensayo típico TP02).

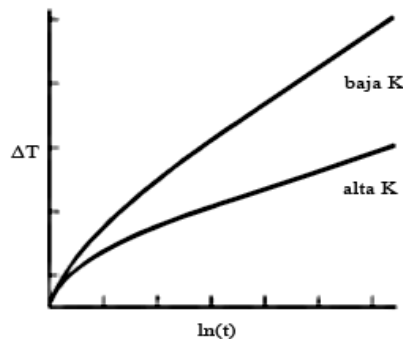


Figura 3.3. Evolución de ΔT en función de $\ln(t)$ en un ensayo NSSP.

En la figura 3.3 se muestra el seguimiento de la variación de temperatura en función del logaritmo del tiempo, observándose la tendencia para un material con una conductividad

térmica elevada y otro material con conductividad térmica baja. Después del periodo transitorio observa un comportamiento lineal de la tendencia. En este periodo estacionario la pendiente de la curva es inversamente proporcional a la conductividad térmica K.

Método	ASTM D 5334-92 y D 5930-97 IEEE Estándar 442-1981
Rango (λ)	0.1 a 6 W/mK
Sensibilidad (ΔT)	Termopar K, ANSI MC96.1-1982
Rango de temperatura (sensor completo)	-55 a +180 °C
Precisión (20 °C)	$\pm (3\% + 0.02)$ W/mK
Dependencia de la precisión con la temperatura	± 0.02 %/K (adicional)
Duración del ciclo de medición	200 s (típico)
Necesidades de potencia	3 V, 1 W (máx.)
Sensor de temperatura (T)	Pt1000 Clase B, IEC 751:1983
Protección de la aguja y la base	IP 68
Protección total sensor:	IP 67

Tabla 3.2. Especificaciones de la sonda NSSP

3.3. Modelos matemáticos

Kelvin desarrollo la teoría de la línea infinita en el año 1861 para el cálculo del transporte térmico en intercambiadores enterrados, fueron las primeras aproximaciones a este modelo.

El primer algoritmo sobre este tema fue desarrollado por Ingersoll & Plass en 1948 [4], simplificado por Guernsey en 1949 y aplicado en 1954 por Penrod.

Muchos investigadores formularon modelos analíticos y numéricos para tratar el problema de la transmisión de calor en el suelo, Kavanaugh [5] y Eskilson [6] son los más reconocidos, aunque la IGSHPA (International Ground Source Heat Pump Association) utiliza para su modelo el algoritmo de Kusada & Achenbach de 1965 [7]. En la siguiente tabla se muestra un resumen de lo que se va a explicar posteriormente:

Autor	Año	Objetivo
Ingersoll & Plass	1948	A través del modelo de línea infinita pretende obtener la distribución radial de temperatura del fluido en el intercambiador en función del tiempo, en base a la temperatura imperturbada del terreno.
Kavanaugh	1985	Toma como base el modelo cilíndrico de Carslaw y Jaeger [8] de forma que obtiene, al igual que Ingersoll y Plass la temperatura del fluido en función del tiempo, pero tomando el flujo de calor por metro de pozo como el intercambiado en una superficie cilíndrica de radio el radio del cilindro considerado.

Eskilson	1987	Calculó la distribución de temperaturas en la pared del pozo en función de Q usando ecuaciones diferenciales en un sistema de coordenadas axial – radial para un pozo simple en un terreno homogéneo con condiciones iniciales y de contorno constantes. Se basó en la función g (<i>g-function</i>) que representa la variación de temperatura de la pared del pozo en un tiempo determinado en respuesta a una excitación térmica en escalón.
Kusada & Achenbach	1965	Definen la temperatura del terreno en una determinada profundidad y un determinado tiempo como función de la temperatura exterior

Tabla 3.3. Tabla resumen de los modelos transitorios.

3.3.1. Ingersoll & Plass. 1948

Desde finales de los años 40 hasta principios de los años 60 la mayoría de las metodologías utilizaban la teoría de la línea infinita, desarrollada por Kelvin en 1861, aplicada al acoplamiento en el terreno por Ingersoll. El modelo de línea infinita se basa en la aproximación de que el intercambiador vertical es una fuente lineal infinita, considerando el suelo como un medio homogéneo a una temperatura inicial constante T_s , que más adelante se define como la temperatura del suelo imperturbado.

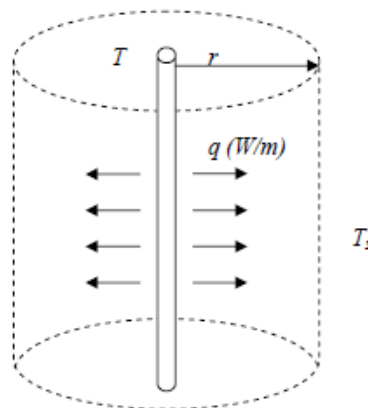


Figura 3.3. Modelo de conducción de calor alrededor de una línea infinita

Esta teoría fue la base para los modelos de Kalman, Penrod e Ingersoll-Plass. La ecuación integral básica usada en este modelo es:

$$\Delta T = \frac{Q'}{2\pi k} \int_{\beta_1}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \tag{3.5}$$

donde: ΔT es la diferencia de temperatura entre el fluido y un punto lejano no afectado, K.
 Q' es el flujo de transferencia de calor por unidad de longitud, W/m.
 k es la conductividad térmica del suelo, W/mK.
 β la variable de integración, adimensional.

$$\beta_1 = \frac{r}{\sqrt{\alpha t}} \quad (3.6)$$

donde: r es la distancia desde el centro de la tubería, m.
 α es la difusividad térmica del suelo, m²/s.
 t es el tiempo transcurrido, s.

Ingersoll y Plass en 1948 formularon el siguiente modelo como solución al modelo integral básico:

$$T = T_s \pm \frac{0,1833 \cdot q}{K_s} \left(\log_{10} \frac{\alpha}{r^2} + 0,106 \frac{r^2}{\alpha t} + 0,351 \right) \quad (3.7)$$

donde: r es la distancia desde el centro de la tubería, m.
 α es la difusividad térmica del suelo, m²/s.
 t es el tiempo transcurrido, s.
 T evolución de la temperatura del fluido a lo largo del tiempo, K.
 T_s es la temperatura del suelo imperturbada, K.
 K_s es la conductividad térmica del terreno (W/mK)
 q flujo de calor por metro de pozo (W/m)

siendo: $\frac{\alpha t}{r^2} \geq 1$

3.3.2. IGSHPA. Kusada & Achenbach. 1965

La IGSHPA para definir su modelo se basa en el algoritmo de Kusada y Achembach de 1965 donde definen la temperatura del terreno en una determinada profundidad y un determinado tiempo como función de la temperatura exterior.

$$T_s(y,t) = T_m - A \cdot e^{-y \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - T_s \frac{y}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right) \quad (3.8)$$

donde: y es la profundidad, m.

- A es la amplitud de la oscilación anual de la temperatura exterior, K.
 t es el tiempo transcurrido, s.
 t_0 es el tiempo con la temperatura más baja en todo el año, s.
 $T_s(y,t)$ es la temperatura del terreno en una determinada profundidad y un determinado tiempo, K.
 T_s es la temperatura exterior en ese instante t, K
 T_m es la temperatura media anual, K.
 α es la difusividad térmica del suelo, m²/s.

Así, se obtienen la temperatura máxima y mínima haciendo extremo el coseno, de esta forma la temperatura máxima se obtendrá con el coseno mínimo (-1) y la temperatura mínima con el coseno máximo (1).

$$T_{MAX} = T_m + A \cdot e^{-y \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \quad (3.9)$$

$$T_{MIN} = T_m - A \cdot e^{-y \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \quad (3.10)$$

Estas son las temperaturas máxima y mínima utilizadas en el epígrafe 3.4.1.1 y 3.4.1.2 para el cálculo de la longitud del intercambiador enterrado.

3.3.3. Kavanaugh. 1985

Kavanaugh formuló un modelo basado en el modelo cilíndrico de Carslaw y Jaeger (1947) Este modelo supone un intercambiador simple enterrado en un suelo infinito con sus propiedades térmicas constantes. La interacción térmica entre perforaciones contiguas se desprecia y se supone que la transferencia de calor es puramente conductiva. Kavanaugh realizó ensayos en diversos lugares y proporcionó datos experimentales. Según él, el modelo funciona bien si se tiene cuidado al elegir los valores iniciales de las propiedades del terreno y la temperatura del agua.

Desde el momento que Kavanaugh asume una sola tubería en U, se introduce un error en la solución al despreciar las interferencias entre varias tuberías en U, al considerar solo una.

Kavanaugh aborda el problema de determinar la distribución de temperaturas alrededor de un tubo enterrado usando la solución del modelo cilíndrico como la solución exacta.

Desarrolló el modelo considerando una sola tubería aislada rodeada por un suelo infinito con las propiedades constantes. Asume conducción pura en un contacto perfecto entre el terreno y la tubería. Como ya se ha apuntado, desprecia las interferencias de pozos adyacentes.

La solución del modelo cilíndrico para un flujo de calor constante se basa en el trabajo de Carslaw & Jaeger (1947) y de Ingersoll (1948, 1954):

$$T - T_s = \frac{q}{K_s} G(z,p) \quad (3.11)$$

donde: $z = \frac{\alpha t}{r^2}$

$$p = \frac{r}{r_0}$$

T evolución de la temperatura del fluido a lo largo del tiempo, K.

T_s es la temperatura del suelo imperturbada, K.

K_s es la conductividad térmica del terreno (W/mK)

q flujo de calor por metro de pozo (W/m)

r₀ es el radio exterior del tubo, m.

α es la difusividad térmica del suelo, m²/s.

r es la distancia a la tubería, m.

t es el tiempo, s.

La expresión G(z,p) es la solución al modelo cilíndrico, función del tiempo y la distancia a la tubería, definida por Carslaw y Jaeger.

3.3.4. Eskilson. 1987

Eskilson propuso en 1987 la función g (*g-function*) para el cálculo rápido de la temperatura de las paredes del pozo perforado. Eskilson calculó la distribución de temperaturas usando ecuaciones diferenciales en un sistema de coordenadas axial – radial para un pozo simple en un terreno homogéneo con condiciones iniciales y de contorno constantes.

Eskilson desarrolló factores adimensionales de respuesta térmica (*g-functions*) para estimar la temperatura con múltiples bucles de intercambiadores de calor enterrados.

La función g representa la variación de temperatura de la pared del pozo en un tiempo determinado en respuesta a una excitación térmica en escalón.

Usando la respuesta de una perforación simple, se puede obtener la respuesta de una configuración más compleja de múltiples perforaciones equiespaciadas como una superposición de perforaciones simples.

Finalmente, estas respuestas muestran curvas de T frente a t, si se adimensionalizan, se obtendrá lo que se denomina *g-function*. Se puede ver un ejemplo a continuación, donde se ve como varia la *g-function* en función del tiempo:

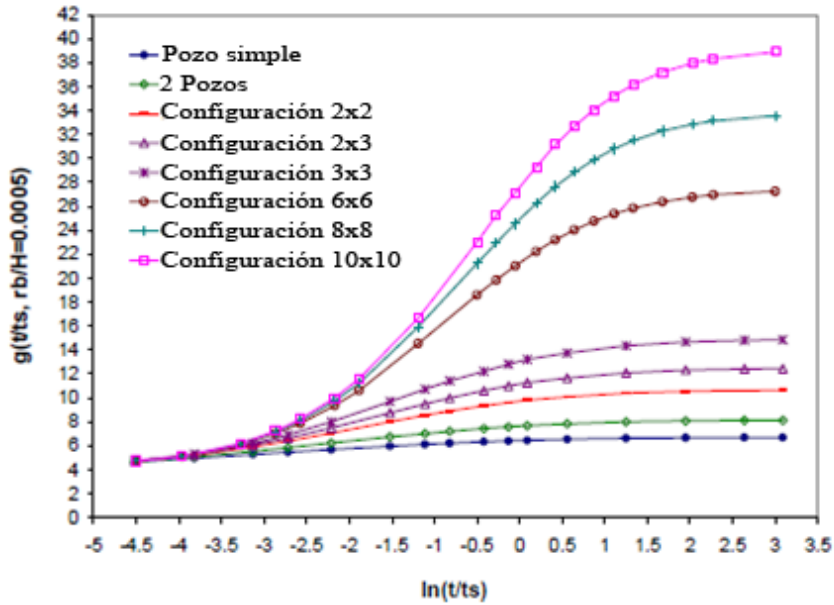


Figura 3.4. Ejemplo de un *g-function* para diferentes agrupaciones.

Una vez conocida la respuesta a una función escalón, la respuesta a cualquier excitación puede ser determinada por la descomposición en una serie de funciones escalón unitario (figura 3.5).

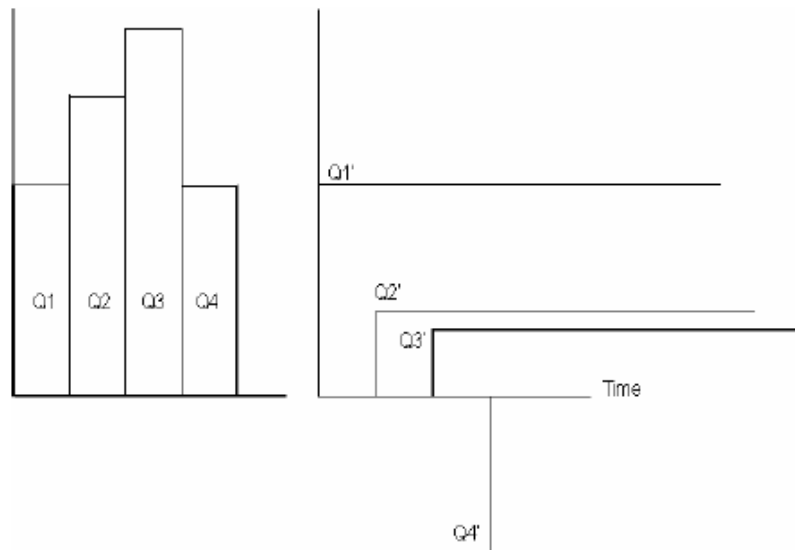


Figura 3.5. Descomposición en escalones unitarios.

Luego, utilizando los factores de respuesta (*g-functions*) a las funciones de cada escalón unidad puede ser determinada la respuesta global.

$$g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right) = \frac{2\pi\lambda}{Q} (\bar{T}_f - R_{\text{eff}}Q - \bar{T}_g) \quad (3.12)$$

- donde:
- t es el tiempo desde el comienzo de la excitación, horas.
 - t_s es la constante de tiempo definida como $t_s = \frac{H^2}{9\alpha}$, horas.
 - α es la difusividad térmica del suelo, m^2/s .
 - r_b es el radio del pozo, m.
 - H es la profundidad del pozo, m.
 - λ es la conductividad térmica del terreno, $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$.
 - T_f es la temperatura media del fluido caloportador, $^\circ\text{C}$.
 - R_{eff} es la resistencia térmica efectiva del pozo, mK/W .
 - Q es la excitación impuesta, W/m .
 - T_g es la temperatura no afectada por el sistema, $^\circ\text{C}$.

Así la temperatura media del fluido al final del n-ésima hora será:

$$\bar{T}_{f,n} = \bar{T}_g - \sum_{i=1}^n \frac{Q_i - Q_{i-1}}{2\pi\lambda} \cdot g\left(\frac{t_n - t_{n-1}}{t_s}, \frac{r_b}{H}\right) - Q_n \cdot R_{\text{eff}} \quad (3.13)$$

A continuación se definirá la resistencia efectiva tanto para sistemas de temperatura constante

$$R_{\text{eff}} \approx R_b + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{H}{C_f V_f}\right)^2 + \frac{1}{12R_b} \cdot \left(\frac{H}{C_f V_f}\right)^2 \quad (3.14)$$

como para sistemas de flujo constante de calor

$$R_{\text{eff}} \approx R_b + \frac{1}{3R_a} \cdot \left(\frac{H}{C_f V_f}\right)^2 \quad (3.15)$$

- donde:
- C_f es el calor específico del fluido caloportador, $\text{J}/\text{Kg}^\circ\text{C}$.
 - V_f es la masa del fluido caloportador, Kg/s .
 - R_a resistencia térmica, mK/W , se define en la ecuación (3.16).
 - R_b resistencia térmica, mK/W , se define en la ecuación (3.17).
 - R_{12}^A resistencia térmica, mK/W , se define en la ecuación (3.20).

$$R_a = \frac{1}{\pi\lambda_b} \left[\beta + \ln\left(\frac{2D}{r_p}\right) + \sigma \cdot \ln\left(\frac{r_b^2 + D^2}{r_b^2 - D^2}\right) \right] - \frac{1}{\pi\lambda_b} \left\{ \frac{\frac{r_p^2}{4D^2} \left[1 + \sigma \frac{4r_b^4 D^2}{r_b^4 - D^4} \right]^2}{\left[\frac{1+\beta}{1-\beta} - \frac{r_p^2}{4D^2} + \sigma \frac{2r_p^2 r_b^2 (r_b^4 + D^4)}{(r_b^4 - D^4)^2} \right]} \right\} \quad (3.16)$$

- donde:
- r_b es el radio del tubo en U, m.
 - D es la distancia entre el centro del pozo y una de las piernas del tubo en U, m.
 - λ_b es la conductividad térmica del material en las conducciones, W/m°C.
 - β se define a continuación, ecuación (3.17).
 - σ se define a continuación, ecuación (3.18).

$$R_b = \frac{1}{2\pi\lambda_b} \left[\beta + \ln\left(\frac{r_b}{r_p}\right) + \ln\left(\frac{r_b}{2D}\right) + \sigma \cdot \ln\left(\frac{r_b^4}{r_b^4 - D^4}\right) \right] - \frac{1}{2\pi\lambda_b} \frac{\frac{r_p^2}{4D^2} \left[1 - \sigma \frac{4D^2}{r_b^4 - D^4} \right]^2}{\frac{1+\beta}{1-\beta} - \frac{r_p^2}{4D^2} \left[1 + \sigma \frac{16r_b^4 D^4}{(r_b^4 - D^4)^2} \right]} \quad (3.17)$$

$$\beta = 2\pi\lambda_b R_p \quad (3.18)$$

- donde: R_p es la resistencia entre el fluido y el exterior del tubo.

$$\sigma = \frac{\lambda_b - \lambda}{\lambda_b + \lambda} \quad (3.19)$$

$$R_{12}^\Delta = \frac{R_a R_b}{R_b - 0,25 \cdot R_a} \quad (3.20)$$

3.4. Dimensionado de captadores

Se va a explicar el método de IGSHPA para el dimensionado de los captadores en las estaciones de invierno (calefacción) y verano (refrigeración).

3.4.1. Verano (refrigeración)

A continuación se muestra, en la figura 3.6, un esquema global del intercambio de flujos en el sistema completo Intercambiador enterrado – Bomba de calor – Local a climatizar.

$$\dot{Q}_c = P_a + P_c \quad (3.21)$$

- donde: \dot{Q}_c es el calor a ceder al intercambiador enterrado, W.

¹ El subíndice ‘c’ representa refrigeración (cooling) y el subíndice ‘a’ representa absorbida (P_a : potencia absorbida de la red eléctrica).

P_a es la potencia absorbida de la red eléctrica, W.
 P_c es la potencia a extraer del local a climatizar, W.

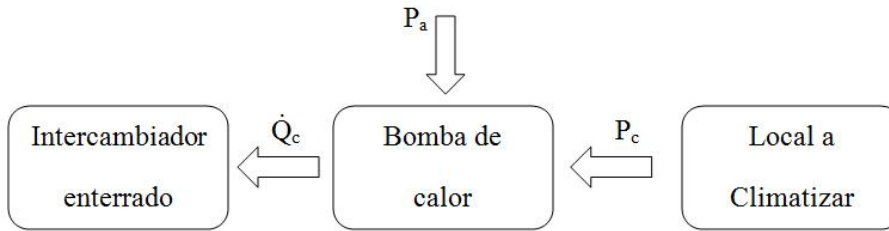


Figura 3.6. Refrigeración, esquema global.

Si este flujo de calor se expresa por unidad de longitud de intercambiador enterrado se tiene:

$$q_c = \frac{\dot{Q}_c}{L_c} \quad (3.22)$$

donde: \dot{Q}_c es el calor a ceder al intercambiador enterrado, W.
 q_c es el calor por unidad de longitud a ceder, W/m.
 L_c es la longitud de intercambiador enterrado, m.

Una vez determinado el flujo de calor en el sistema global se va a estudiar el intercambiador en régimen permanente:

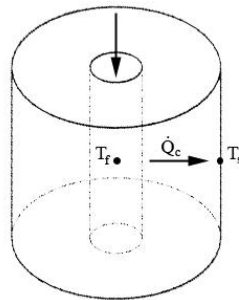


Figura 3.7. Balance en el intercambiador enterrado

$$q_c = \frac{T_f - T_s}{R_T} \quad (3.23)$$

donde: R_T es la resistencia térmica del conjunto, mK/W.
 q_c es el calor por unidad de longitud a ceder, W/m.
 T_f es la temperatura en el seno del fluido, K.
 T_s es la temperatura en la superficie del intercambiador, K.

La ecuación (3.23) se obtiene aplicando la ley de Fourier en el sistema representado en la figura 3.7. R_T se calcula como:

$$R_T = R_t + R_s \cdot F_{u,c} \quad (3.24)$$

donde:

- R_T es la resistencia térmica del conjunto, mK/W.
- R_t es la resistencia térmica de la tubería, mK/W.
- R_s es la resistencia térmica del suelo, mK/W.
- $F_{u,c}$ es el factor de utilización de la instalación, adimensional.

La resistencia térmica del suelo (R_s) es una función del tiempo desde cuando el terreno cede o absorbe calor, del radio afectado (distancia del punto del terreno hasta la tubería) y la difusividad térmica del mismo (definida en el epígrafe 3.2)

El factor de utilización ($F_{u,c}$) es la fracción de tiempo en el cual la bomba de calor permanece en funcionamiento. Su cálculo se deriva de las simulaciones que determinan las cargas térmicas. En cada edificio, y dependiendo de cada clima y sistema de climatización, el factor de utilización varía.

La resistencia térmica de la tubería se puede expresar como:

$$R_t = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot k_t} \ln \left(\frac{D_e}{D_i} \right) \quad (3.25)$$

donde:

- R_t es la resistencia térmica de la tubería, mK/W.
- k_t Es la conductividad térmica de la tubería, W/mK.
- D_i diámetro interior de la tubería, m.
- D_e diámetro exterior de la tubería, m.

Si sustituimos la ecuación (3.21) en (3.22) e igualamos (3.22) a (3.23) obtenemos,

$$\frac{P_a + P_c}{L_c} = \frac{T_f - T_s}{R_T} \quad (3.26)$$

de donde podemos despejar L_c :

$$L_c = \frac{(P_a + P_c) \cdot R_T}{T_f - T_s} \quad (3.27)$$

y sustituyendo (3.24) en (3.26), se obtiene la longitud necesaria de intercambiador enterrado, (3.27)

$$L_c = \frac{(P_a + P_c) \cdot (R_t + R_s \cdot F_{u,c})}{T_f - T_s} \quad (3.28)$$

Si además se toman las temperaturas máximas para obtener el caso extremo, T_{MAX} del fluido y T_H (high temperature) del suelo, y se expresan las potencias en función del COP de la bomba de calor, se obtienen las expresiones que describe el método IGSHPA:

$$COP_c = \frac{P_c}{P_a} \quad (3.29)$$

donde: COP_c es el *coefficient of performance* en régimen de refrigeración de la bomba de calor, adimensional.

$$P_a + P_c = P_c \cdot \frac{COP_c + 1}{COP_c} \quad (3.30)$$

$$L_c = \frac{P_c \cdot \frac{COP_c + 1}{COP_c} \cdot (R_t + R_s \cdot F_{u,c})}{T_H - T_{MAX}} \quad (3.31)$$

donde: T_{MAX} es la temperatura máxima del suelo, K.

T_H es la temperatura máxima del fluido, K.

La temperatura máxima del suelo se obtendrá en epígrafes posteriores a partir del modelo transitorio del sistema, con el modelo IGSHPA de Kusada & Achenbach.

3.4.2. Invierno (calefacción)

Análogamente al régimen de verano, se desarrollan los cálculos que siguen para obtener la longitud del intercambiador enterrado para el régimen de calefacción en invierno.

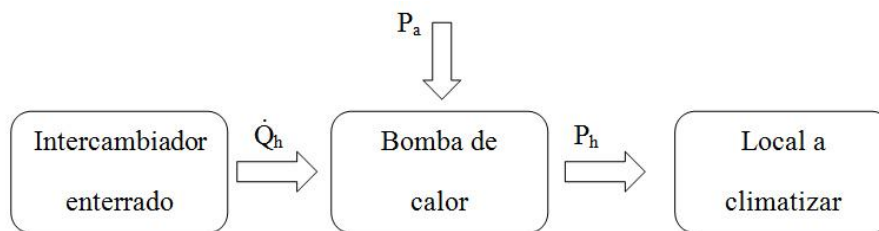


Figura 3.8. Calefacción, esquema global.

$$\dot{Q}_h = P_h - P_a \quad (3.32)$$

donde: \dot{Q}_h es el calor a absorber del intercambiador enterrado, W.

² El subíndice 'h' representa calefacción (heating).

P_a es la potencia absorbida de la red eléctrica, W.

P_h es la potencia a ceder al local a climatizar, W.

Si este flujo de calor se expresa por unidad de longitud de intercambiador enterrado se tiene:

$$q_h = \frac{\dot{Q}_h}{L_h} \quad (3.33)$$

donde: \dot{Q}_h es el calor a absorber del intercambiador enterrado, W.

q_h es el calor por unidad de longitud a absorber, W/m.

L_h es la longitud de intercambiador enterrado, m.

En el intercambiador se tiene,

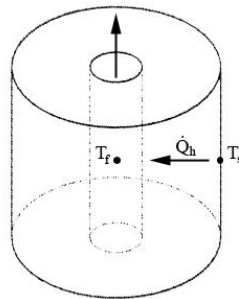


Figura 3.9. Balance en el intercambiador enterrado

$$q_h = \frac{T_s - T_f}{R_T} \quad (3.34)$$

donde: q_h es el calor por unidad de longitud a absorber, W/m.

R_T es la resistencia térmica del conjunto, mK/W.

T_f es la temperatura en el seno del fluido, K.

T_s es la temperatura en la superficie del intercambiador, K.

Con R_T la misma que se definió en la ecuación (3.24). Si sustituimos la ecuación (3.32) en (3.33) e igualamos (3.33) a (3.34) obtenemos,

$$\frac{P_h - P_a}{L_h} = \frac{T_s - T_f}{R_T} \quad (3.35)$$

de donde podemos despejar L_h :

$$L_h = \frac{(P_h + P_a) \cdot R_T}{T_s - T_f} \quad (3.36)$$

y sustituyendo (3.24) en (3.36), se obtiene la longitud necesaria de intercambiador enterrado, (3.37), donde R_s y F_u se definieron en el epígrafe de refrigeración,

$$L_h = \frac{(P_h + P_a) \cdot (R_t + R_s \cdot F_{u,h})}{T_s - T_f} \quad (3.37)$$

Si además se toman las temperaturas mínimas para obtener el caso extremo, T_{MIN} del fluido y T_L (low temperature) del suelo, y se expresan las potencias en función del COP de la bomba de calor, se obtienen las expresiones que describe el método IGSHPA:

$$COP_h = \frac{P_h}{P_a} \quad (3.38)$$

donde: COP_h es el *coefficient of performance* en régimen de calefacción de la bomba de calor, adimensional.

$$P_h - P_a = P_h \cdot \frac{COP_h - 1}{COP_h} \quad (3.39)$$

$$L_h = \frac{P_h \cdot \frac{COP_h - 1}{COP_h} \cdot (R_t + R_s \cdot F_{u,h})}{T_{MIN} - T_L} \quad (3.40)$$

donde: T_{MIN} es la temperatura mínima del suelo, K.

T_L es la temperatura mínima del fluido, K.

La temperatura mínima del suelo se obtendrá en epígrafes posteriores a partir del modelo transitorio del sistema, con el modelo IGSHPA de Kusada & Achenbach.

La longitud que se empleará en el sistema será la mayor de las obtenidas en regímenes de verano e invierno, para cumplir así las especificaciones en las dos estaciones.