

4. Aplicaciones.

Esta sección se fundamenta en la *caracterización térmica del terreno al ser excitado por un fluido a alta temperatura*. Para ello, se han realizado múltiples análisis, variando distintas magnitudes en cada caso, mediante un algoritmo soportado por *Matlab* [10].

El estudio se centrará en tres casos particulares que abarcan la entrada del fluido caloportador al terreno a temperatura constante, así como el tratamiento e integración de varios ficheros de carga proporcionados por programas de cálculo de cargas térmica y analizando por último, el efecto de la inclusión de etapas de refrigeración intermedias.

4.1 Temperatura de entrada constante.

En esta situación se ha considerado que el fluido caloportador, en este caso agua, es introducida en las tuberías enterradas a una determinada temperatura constante para todos los instantes de tiempo.

Los datos de diseño con los que se ha realizado la simulación son mostrados a continuación:

- Localidad. Sevilla
 - Temperatura media subsuelo: 18.6 °C

La temperatura media de la corteza terrestre, a falta de datos exactos, puede aproximarse por la temperatura media de la localidad. Estos valores han sido tomados de mediciones realizadas en el Aeropuerto de Sevilla durante varios años [7].

- Propiedades del terreno.
 - Densidad: 2 000 kg/m³
 - Calor específico: 800 J/(kg·°C)
 - Volumen: 30x20x9 m³
- Disposición del emparrillado de tubos.
 - Paralelo horizontal con retorno directo
 - Número de tubos: 30
 - Longitud de tubos: 20 m.
 - Diámetro de tubos: 5 cm.
- Temperatura de entrada del agua.
 - $T_{ew} = 50$ °C
- Gasto másico de agua.
 - $m_w = 10$ kg/s

Integrando la ecuación diferencial ordinaria, detallada en el Capítulo 3.1, con la condición inicial de que la temperatura del suelo en el instante de comienzo es igual a la temperatura media del subsuelo, se obtienen los resultados mostrados a continuación.

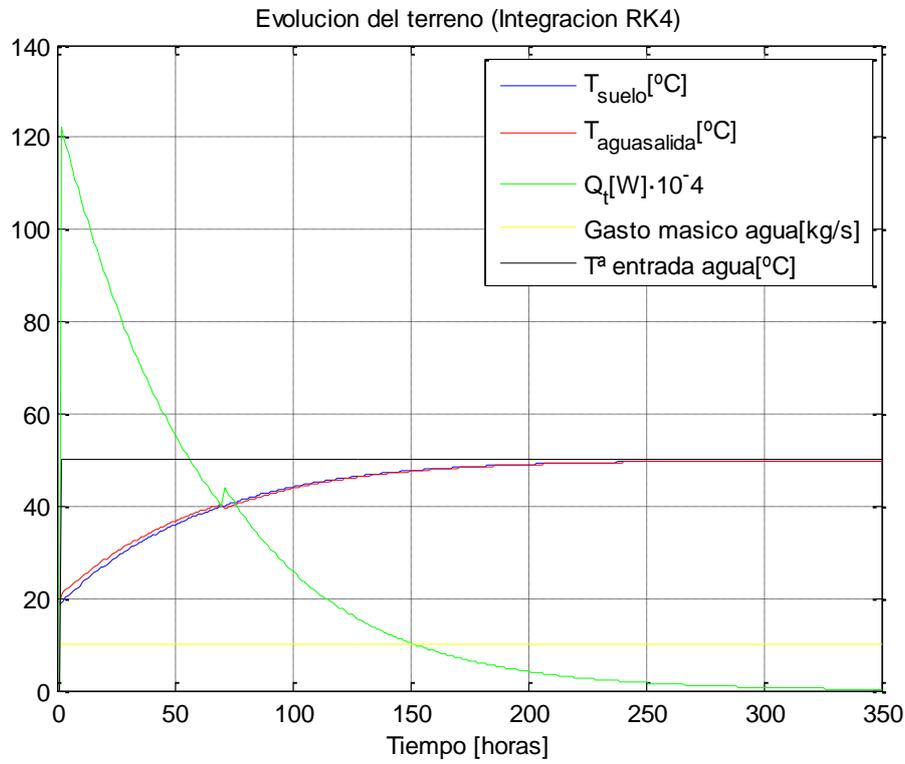


Figura 35.- Evolución terreno a T^a entrada cte.

De la tendencia de la curva se puede concluir que, en los instantes iniciales la transferencia de calor es mayor, como cabía esperar, ya que existe mayor diferencia de temperatura entre el fluido caloportador y el terreno. De este modo, transcurridas aproximadamente 250 horas de funcionamiento continuo, la transferencia de calor es tan reducida que el terreno es incapaz de absorber más cantidad de energía térmica, se dirá entonces que el terreno se encuentra saturado térmicamente.

El tiempo de colmatación del terreno es el adecuado teniendo en cuenta el elevado volumen del mismo, así como la elevada capacidad de almacenamiento térmico con que cuenta.

La potencia térmica transferida por convección ha de ser equivalente a la cedida por reducción de la temperatura del fluido caloportador, como muestra la Figura 36.

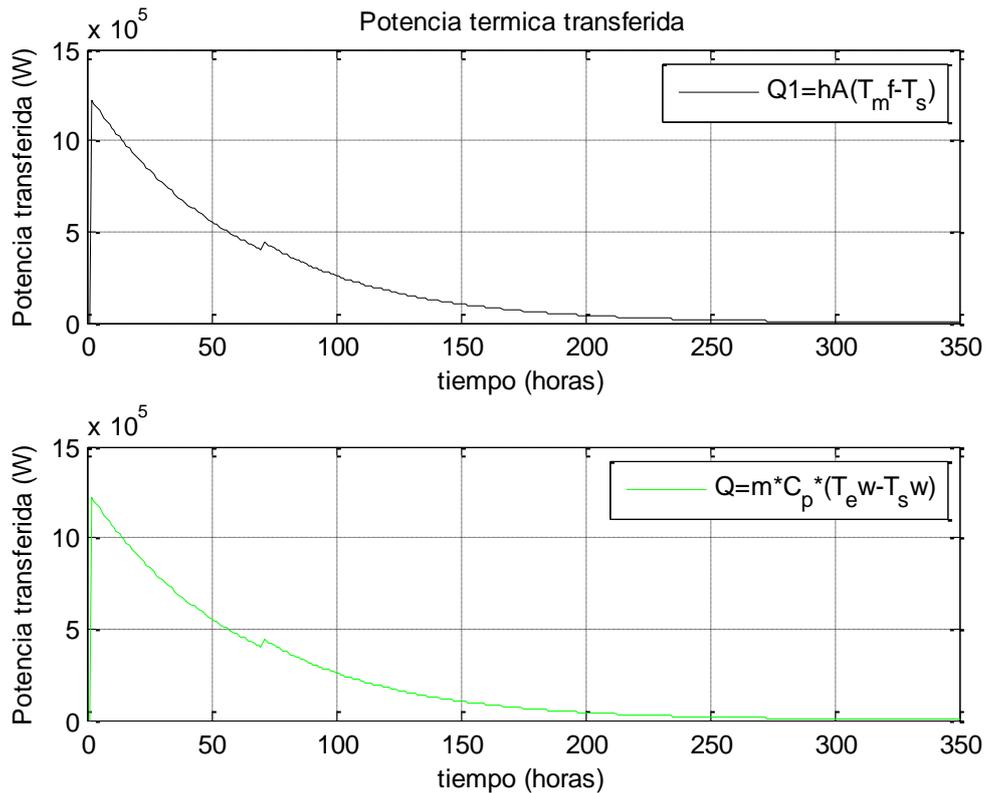


Figura 36.- Flujo de calor transferido a T^a entrada cte.

Como se podía esperar, la tendencia es decreciente, tanto mayor, cuanto más cerca del instante inicial se encuentre, debido al salto térmico entre el terreno y el fluido. Por ello, se puede destacar que la transferencia de energía térmica es eficiente, aproximadamente, durante las dos terceras partes del tiempo que tarda el terreno en colmatarse.

4.1.1 Análisis de sensibilidad.

A continuación, se ha procedido a la variación de parámetros de interés en el estudio que se ha realizado, para su posterior análisis y extracción de conclusiones.

En cada caso, únicamente se ha modificado una magnitud, manteniendo el resto invariables.

▪ **Caudal másico de entrada.**

En el caso de que la máquina enfriadora funcione en régimen discontinuo, y el gasto másico necesario para satisfacer la demanda térmica en el condensador se reduzca en un determinado instante tras su puesta en funcionamiento, la respuesta térmica del terreno sigue una tendencia mostrada en la Figura 37.

Para una reducción del caudal másico de agua de 10 kg/s a 5 kg/s, a las 75 horas de funcionamiento ocurre lo siguiente.

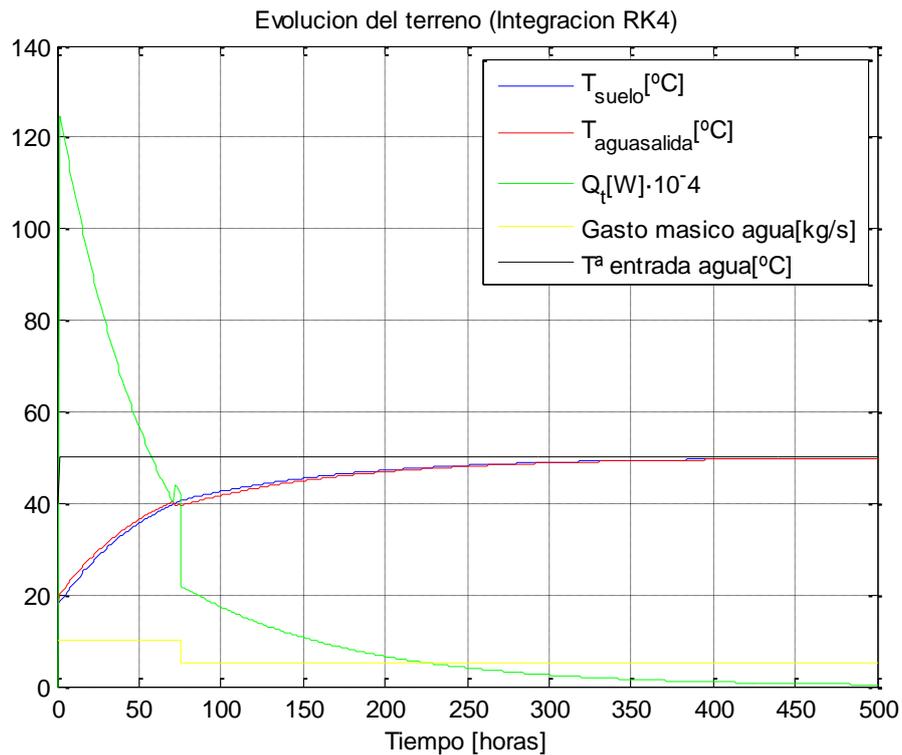


Figura 37.- Análisis de sensibilidad. Decremento gasto másico.

Se observa cómo la transferencia de calor cesa, debido a que el gasto másico es la magnitud más influyente en la transmisión de energía térmica.

El tiempo de colmatación del terreno se ubica alrededor de las 375 horas, habiendo disminuido la transferencia de energía térmica, al decrementarse el gasto másico que circula por la instalación.

En cambio, si se incrementa el caudal másico que recorre las tuberías enterradas desde 10 kg/s hasta 20 kg/s, sucede lo mostrado en la Figura 38.

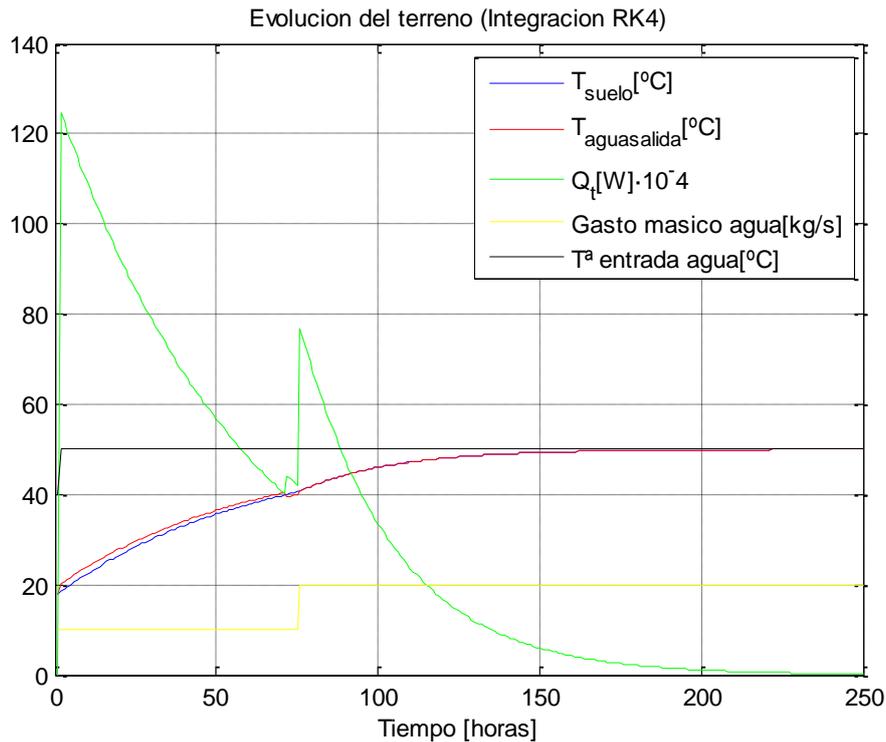


Figura 38.- Análisis de sensibilidad. Incremento gasto másico.

Se puede observar, cómo al aumentar el gasto másico el terreno tiende más rápidamente a la temperatura de entrada de agua, ya que se dispara la transferencia de calor. Ésta aumenta por dos razones, la primera es la relación directa entre el gasto másico y la potencia térmica transferida, mientras que la segunda es el aumento del coeficiente de película al incrementarse la velocidad del fluido, como consecuencia del aumento del gasto másico a sección de paso invariante.

- **Temperatura de entrada.**

En el caso en el que se desee modificar la temperatura de entrada del agua al terreno, a caudal másico constante, resultará lo mostrado en las Figuras 30 y 31, dependiendo de si se incrementa o decrementa.

Si la temperatura de entrada modifica su valor de 50 °C a 80 °C a las 75 horas del instante inicial, sucede lo siguiente.

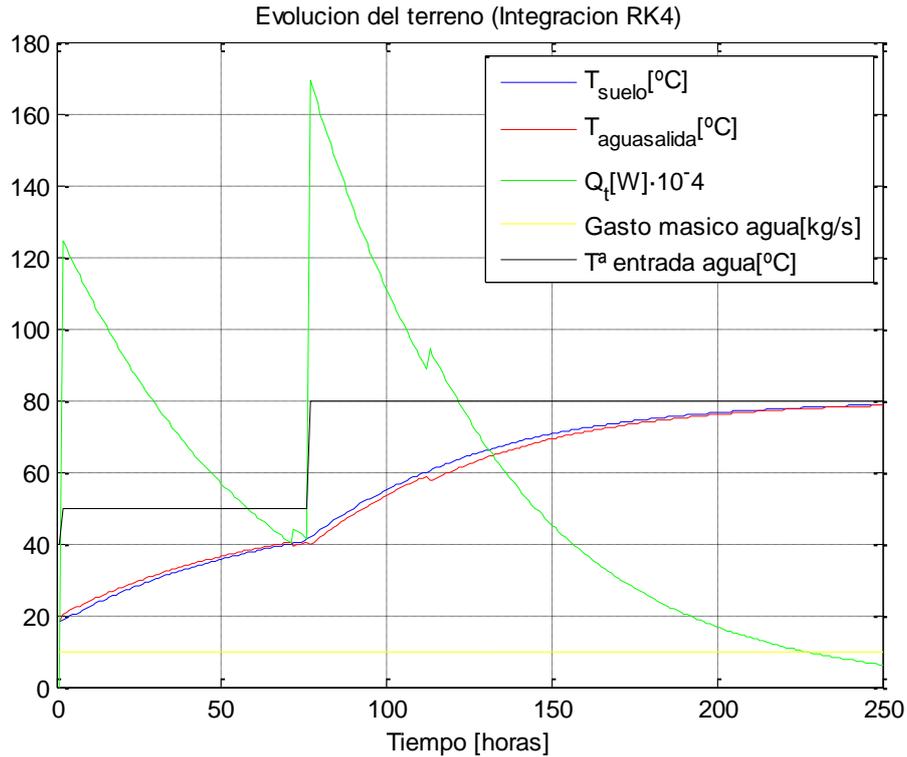


Figura 39.- Análisis de sensibilidad. Incremento temperatura de entrada.

El resultado obtenido es consecuente, ya que al aumentar la temperatura, la energía térmica transferida se incrementa, elevando la temperatura del terreno hasta su saturación.

Se observa que el aumento del caudal másico es más relevante sobre la energía transferida que el aumento de la temperatura de entrada, ya que, en el caso de aumentar la temperatura de entrada, el tiempo de saturación térmica del terreno no se reduce tanto como al aumentar el caudal másico.

A continuación se procede a la disminución de la temperatura de entrada para visualizar el efecto generado en el terreno.

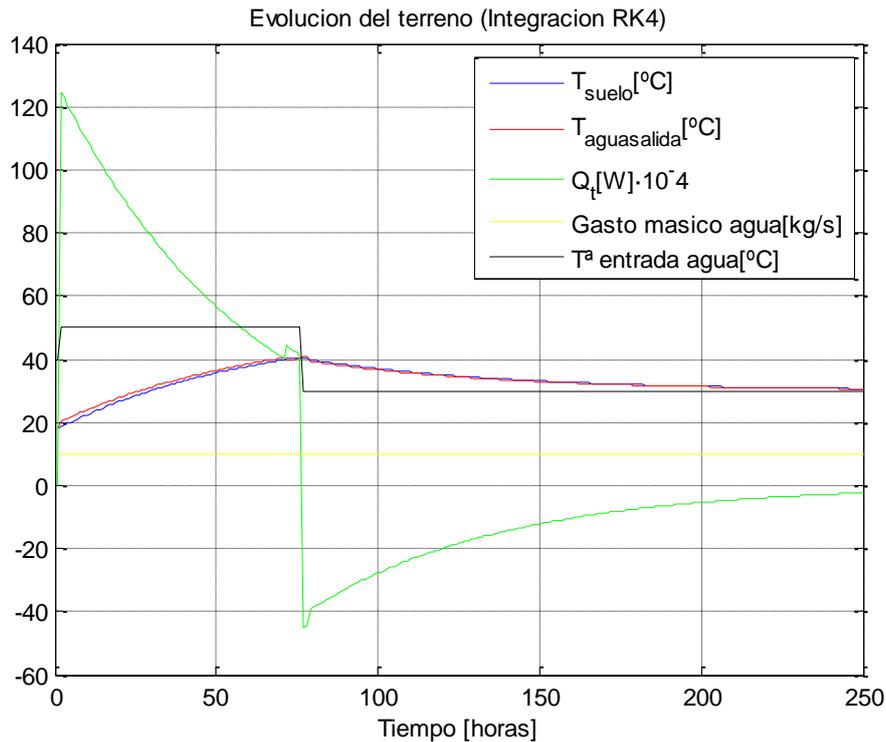


Figura 40.- Análisis de sensibilidad. Decremento temperatura de entrada.

El resultado es el esperado, puesto que al disminuir la temperatura de 50 °C a 30 °C, tras un determinado tiempo, se invierte el flujo de calor, ya que a partir de este instante, el calor es cedido al fluido por parte del terreno, debido a que se encuentra a mayor temperatura.

Esto servirá para estudiar los ciclos de carga y descarga a los que se puede someter al terreno en un supuesto ideal, es decir, comportándose como un sistema de capacidad.

▪ Longitud de los conductos.

En este apartado es discutido el efecto de la variación de la longitud de los ramales que circulan desde el colector de entrada al de salida.

Para el caso base, la longitud de los conductos es de 20 metros y origina una respuesta representada en la Figura 41.

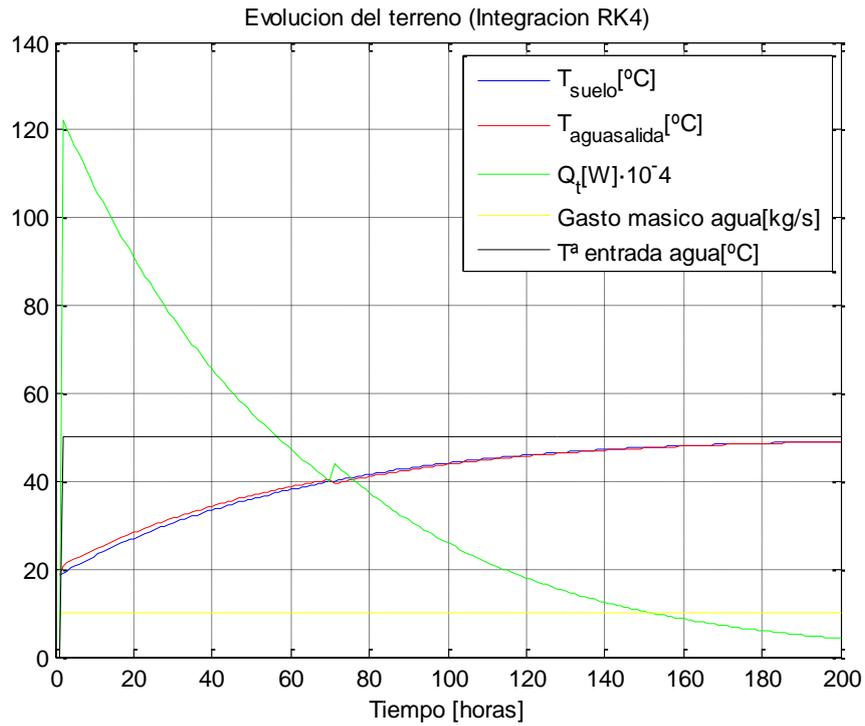


Figura 41.- Análisis de sensibilidad. Caso base longitud de conductos.

Si se aumenta la longitud de los conductos al doble, el terreno responde de la siguiente manera.

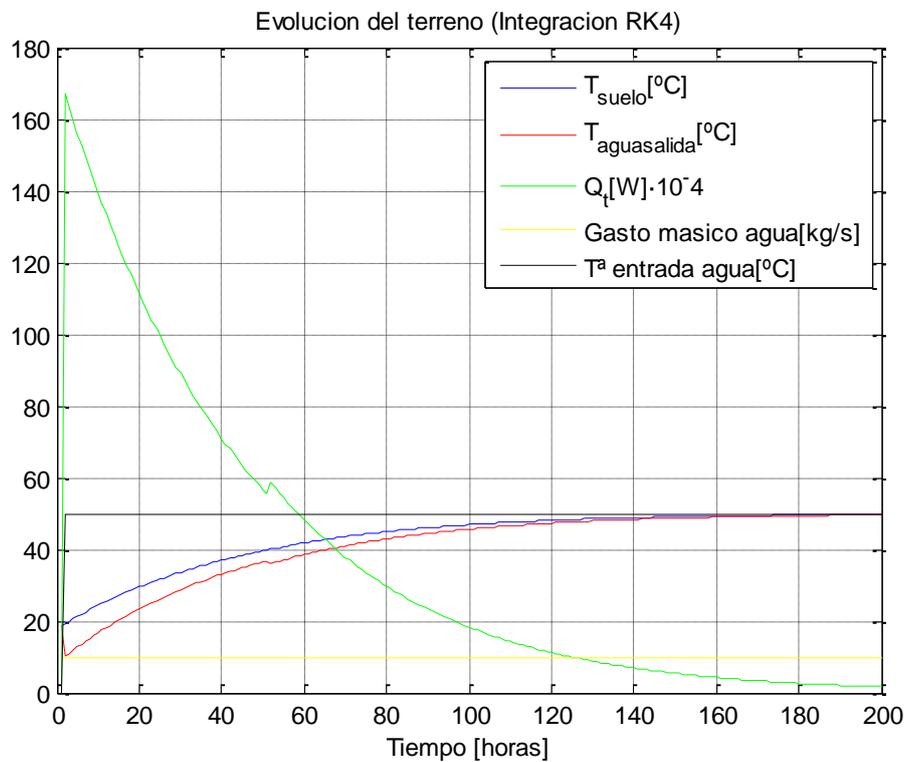


Figura 42.- Análisis de sensibilidad. Incremento longitud de conductos.

Como se puede observar, la potencia térmica transferida ha aumentado por efecto del aumento del área de transferencia. Como consecuencia de esto, el tiempo de colmatación del terreno se ha reducido aproximadamente a dos terceras partes del caso inicial.

También se puede destacar que la temperatura de salida del agua disminuye como consecuencia de una mayor longitud de tubería recorrida por el fluido, con lo que el tiempo de residencia del fluido en el sistema es superior. Es conveniente destacar que en la realidad, la temperatura de salida del fluido caloportador no es inferior a la del terreno, pero en el tratamiento numérico en *Matlab* resulta de esta manera, debido a que se ha estado considerando la temperatura media de masa en la ecuación de transferencia convectiva (Ecuación 5).

Por el contrario, la disminución de la longitud de los conductos tendrá un efecto inverso sobre el terreno respecto del caso anterior.

En este caso la longitud se ha reducido a la mitad de la inicial (10 metros) con la consiguiente evolución seguida por el terreno.

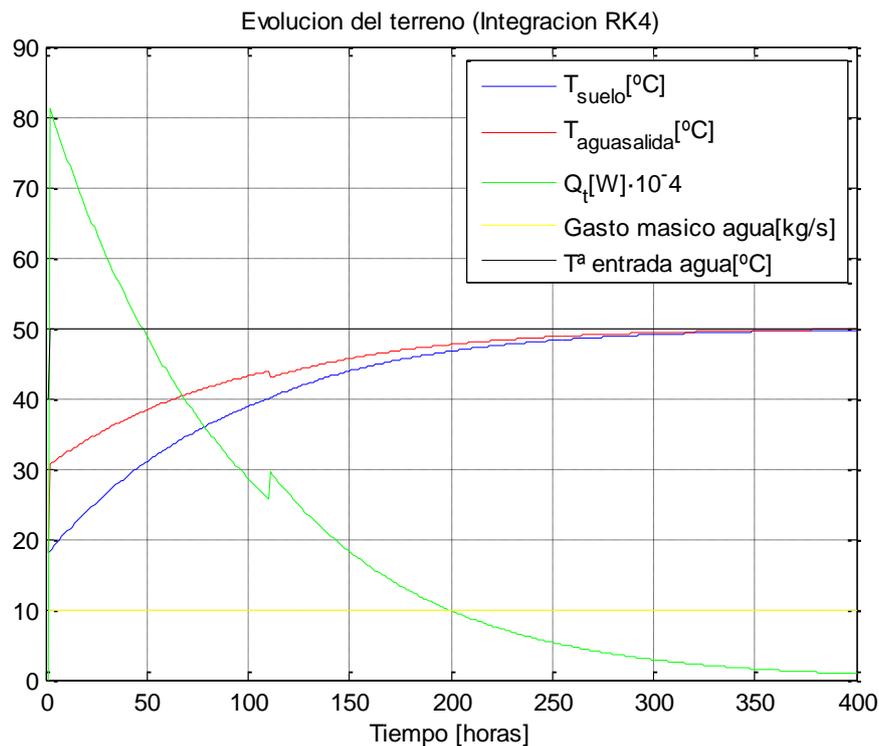


Figura 43.- Análisis de sensibilidad. Decremento longitud de conductos.

Como era de esperar, el tiempo de colmatación del terreno se duplica al reducirse a la mitad el área de transferencia, debido a la reducción del calor intercambiado.

▪ Diámetro de los conductos.

En este apartado se modificará el diámetro de los conductos que afectan al calor intercambiado en dos aspectos diferentes: en primer lugar, al área de transferencia, y en segundo lugar, al coeficiente de película, ya que éste es muy dependiente de la velocidad del fluido que circula por el interior de los tubos.

Como caso inicial se tomará un diámetro de conductos de 10 centímetros.

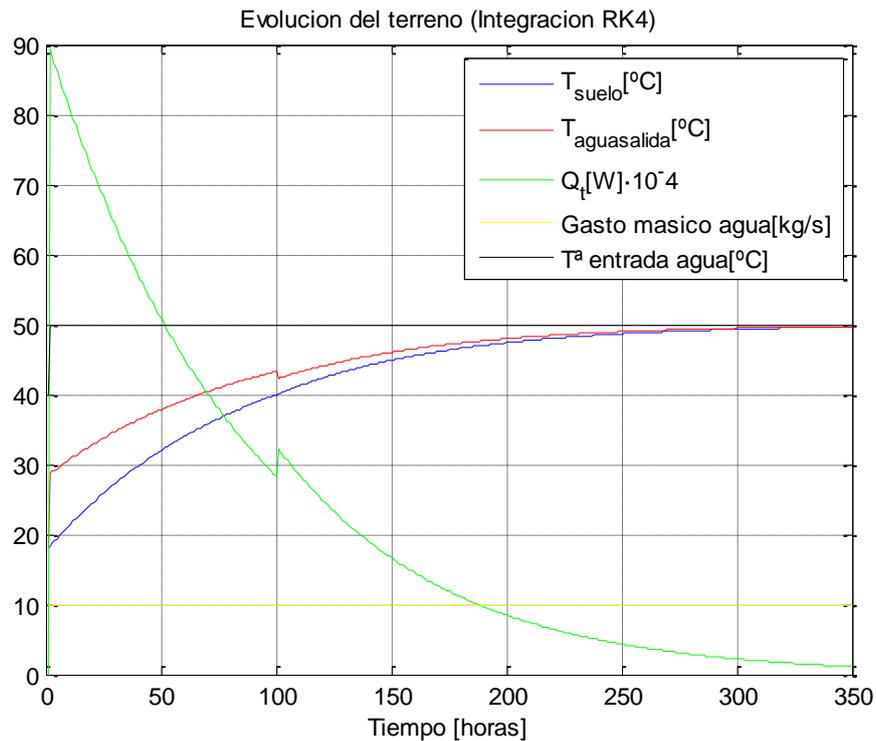


Figura 44.- Análisis de sensibilidad. Caso base diámetro de conductos.

Si se reduce el diámetro de los conductos a la mitad se observa la tendencia mostrada en la Figura 45.

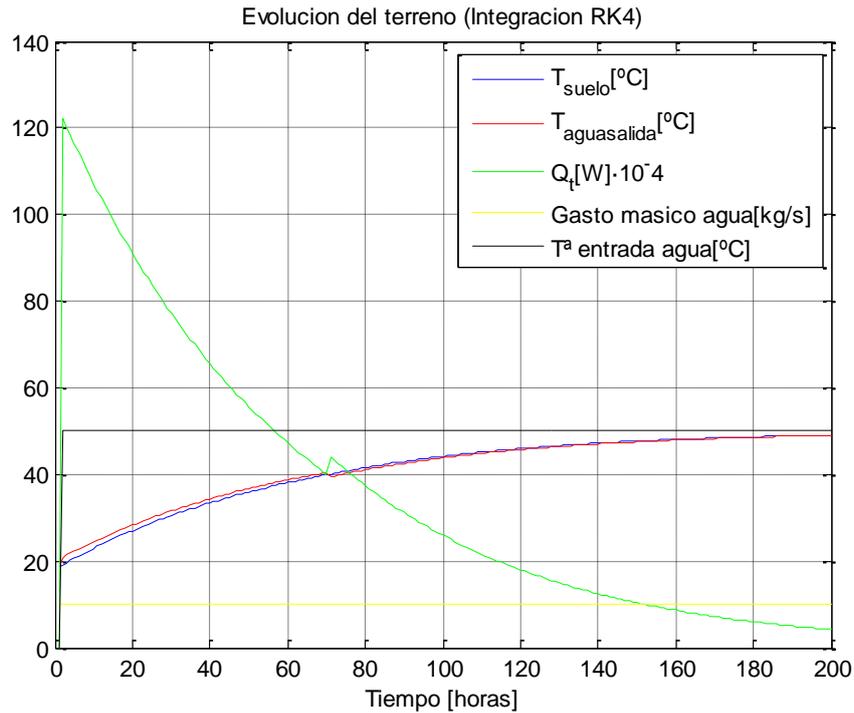


Figura 45.- Análisis de sensibilidad. Decremento diámetro de conductos.

El efecto era el que cabía de esperar, la disminución del tiempo de saturación térmica del terreno, debido al aumento de la transferencia de energía térmica como consecuencia del incremento del coeficiente de película (aumento de la velocidad de paso por el circuito enterrado).

Elevar el diámetro de las tuberías enterradas conlleva efectos inversos a los anteriormente comentados, como muestra la Figura 46.

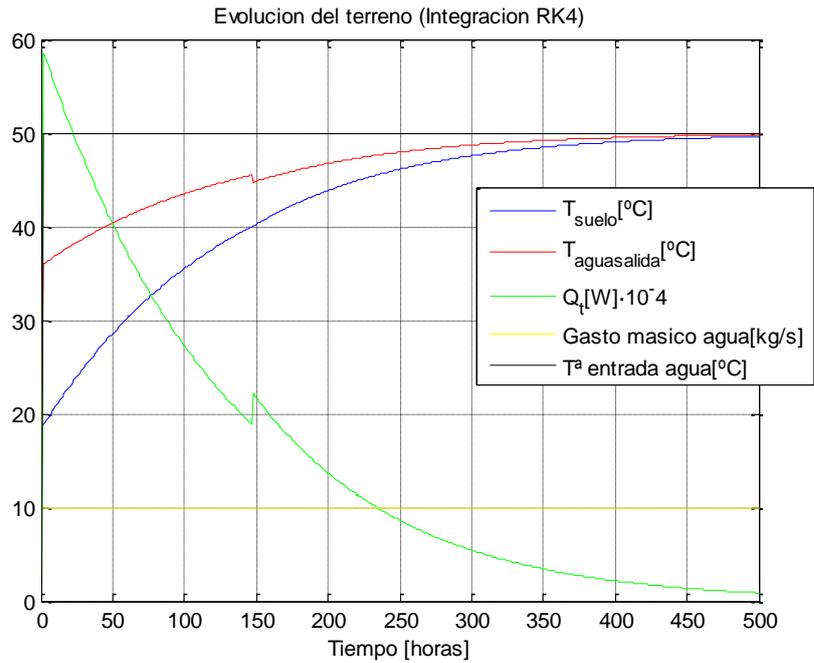


Figura 46.- Análisis de sensibilidad. Incremento diámetro de conductos.

Se observa como el tiempo de saturación del terreno se sitúa alrededor de las 500 horas, siendo el calor transferido muy reducido desde el comienzo, por efecto de la disminución de la velocidad de paso del fluido, a pesar del aumento del área de transferencia motivado por el aumento del diámetro de los tubos.

Se puede mencionar que, el agua de salida reduce su temperatura en los instantes iniciales conforme se disminuye el diámetro de las conducciones, debido a que el tiempo de residencia del fluido en el interior del sistema se hace menor, originando un aumento de la velocidad de paso. El aumento de la velocidad del fluido de trabajo origina un incremento del coeficiente de transferencia convectivo, por lo que el agua es extraída, del sistema de tubos enterrados, a menor temperatura respecto del caso inicial.

Es destacable el hecho de que la variación del diámetro de las conducciones tiene mayor influencia sobre el coeficiente de película que sobre el área de transferencia, con la implicación que ello conlleva sobre el calor transferido en el sistema.

▪ **Número de conductos.**

En este caso se realizará un análisis de sensibilidad del número de conductos. Este factor afecta principalmente al área de transferencia y al coeficiente de transferencia convectivo a través de la velocidad en los mismos.

Tomando como caso base 30 conductos, se obtiene la siguiente evolución.

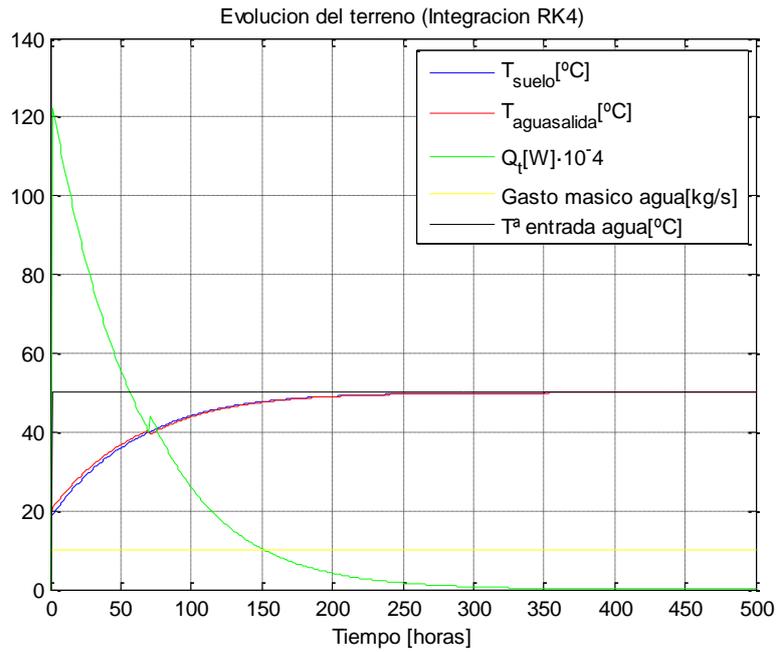


Figura 47.- Análisis de sensibilidad. Caso base número de conductos.

Al triplicarse el número de tubos que circulan desde el colector de entrada hasta el de salida se obtiene la Figura 48.

En ella se puede ver como disminuye el tiempo de saturación del terreno por el aumento de potencia térmica transferida, debido al aumento del área de transferencia.

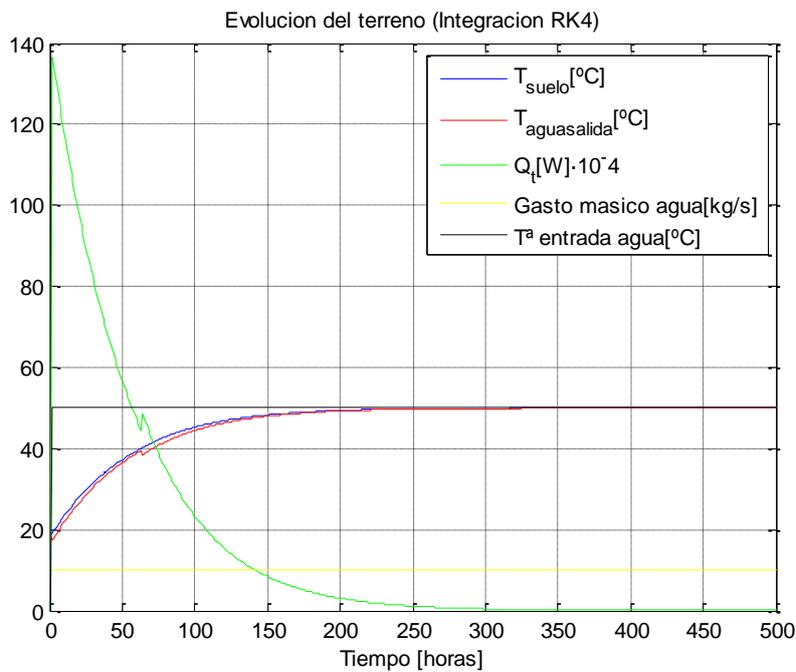


Figura 48.- Análisis de sensibilidad. Incremento número de conductos.

En cambio, al reducirse el número de divisiones en las que se deriva el fluido caloportador entre colectores, se obtiene la representación mostrada en la Figura 49.

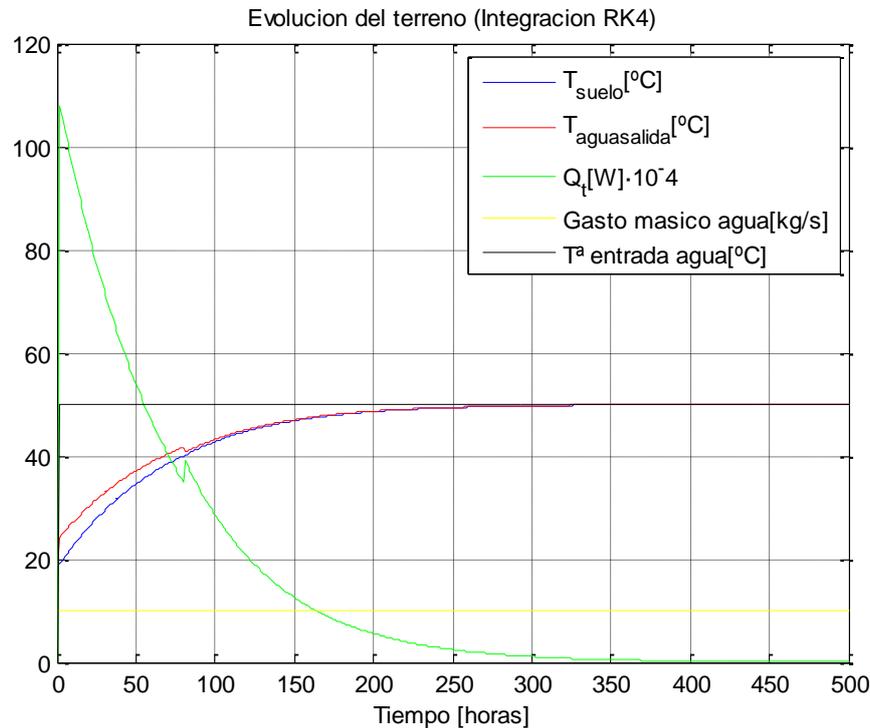


Figura 49.- Análisis de sensibilidad. Decremento número de conductos.

En este caso, se observa el aumento del tiempo necesario para la saturación térmica del terreno al reducirse el intercambio térmico entre el terreno y el agua. A pesar del aumento de la velocidad del fluido, que lleva asociado un aumento del coeficiente de transferencia convectivo, el tiempo de colmatación aumenta debido a la disminución del área de transferencia, que conlleva la reducción de energía térmica transferida comentada.

Se puede concluir que la variación del número de tuberías tiene mayor influencia sobre el área de transferencia que sobre el coeficiente de película, lo que explica las tendencias observadas.

▪ **Volumen de terreno.**

En esta situación, se ha modificado el volumen de terreno sobre el que se realiza el almacenamiento térmico. Para ello, se ha partido de un caso base determinado por un volumen de $30 \times 20 \times 9 \text{ m}^3$.

La respuesta obtenida es representada en la Figura 50.

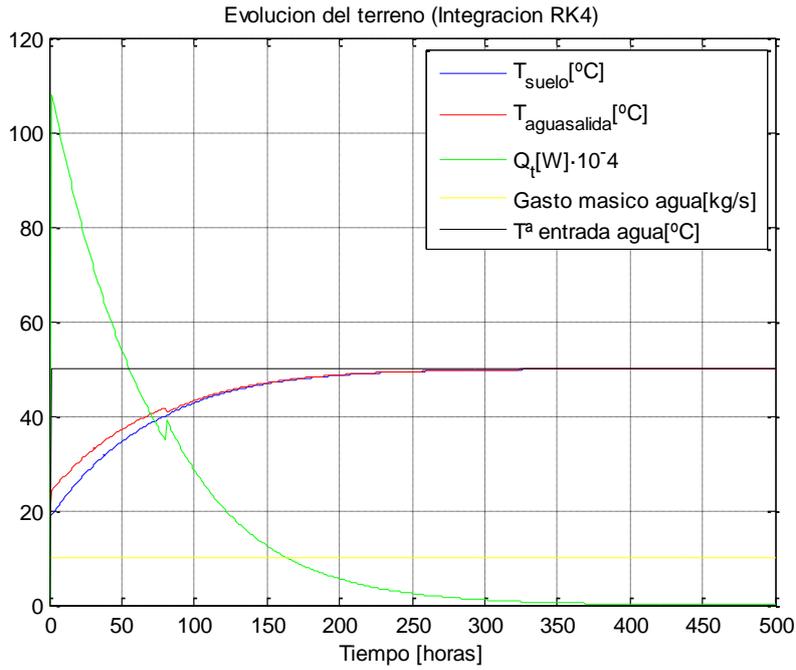


Figura 50.- Análisis de sensibilidad. Caso base volumen de terreno.

Si se incrementa el volumen de almacenamiento a 30 metros de profundidad, sucede lo mostrado en la Figura 51.

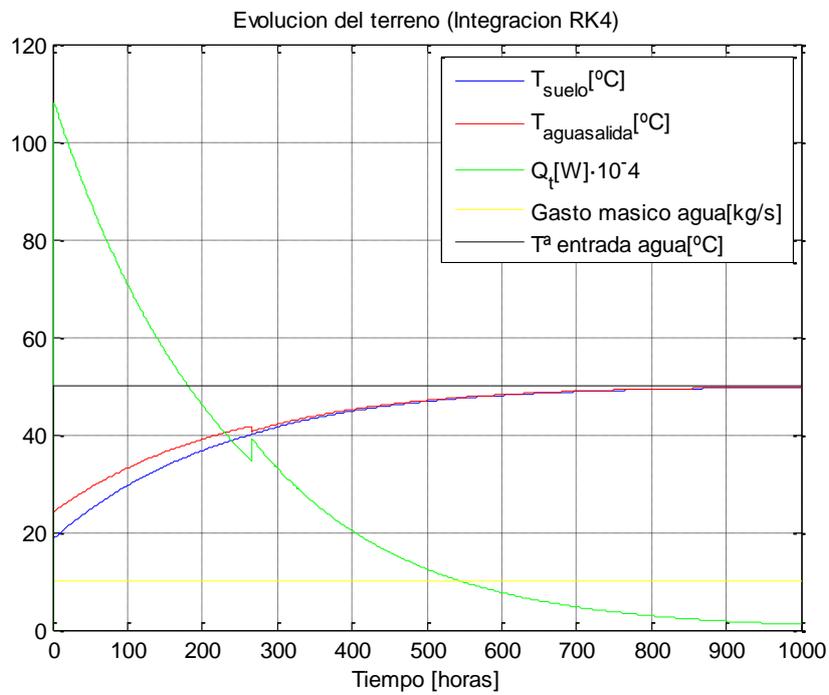


Figura 51.- Análisis de sensibilidad. Incremento volumen de terreno.

Sucede lo esperado, esto es, el tiempo de saturación térmica se incrementa debido al incremento de la capacidad térmica de almacenamiento de terreno. Es decir, contamos con mayor cantidad de masa para almacenar energía térmica que en el caso anterior.

Si se reduce la masa disponible para almacenar energía sucede el efecto opuesto al comentado anteriormente.

También es destacable que el tiempo de saturación se reduce considerablemente al considerar un metro de profundidad en lugar de los nueve metros del caso base. Se observa la gran dependencia térmica del terreno respecto de las características geométricas disponibles para almacenamiento térmico.

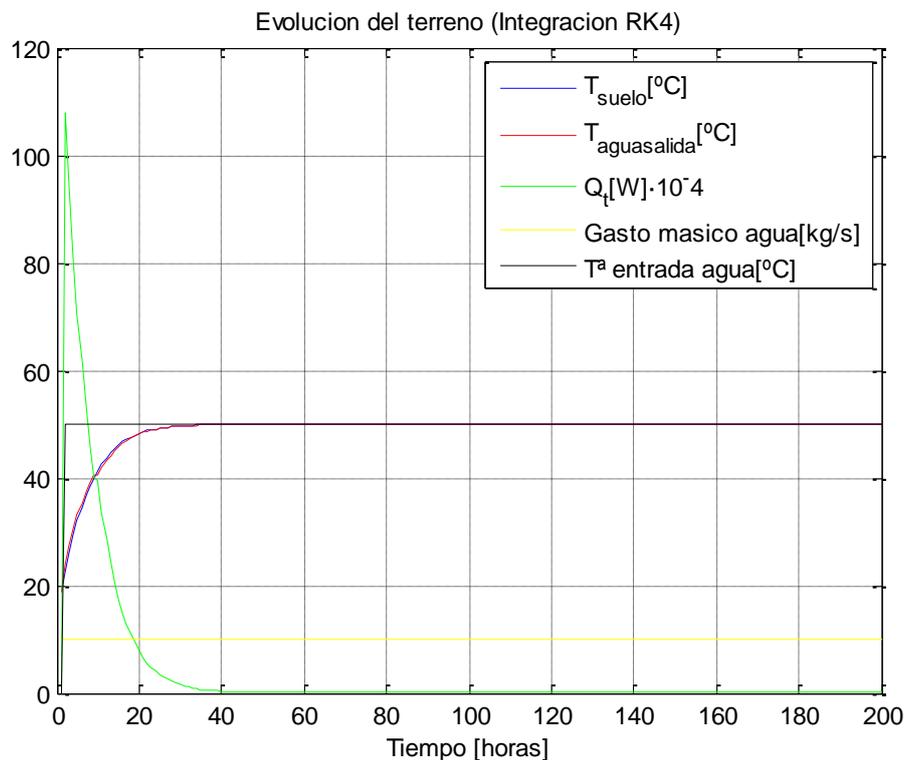


Figura 52.- Análisis de sensibilidad. Decremento volumen de terreno.

4.1.2 Resultados y tendencias de interés.

Tras la realización del análisis de sensibilidad de los distintos parámetros puestos en juego en este estudio, se pueden extraer las principales conclusiones.

Se puede destacar que el gasto másico tiene más influencia sobre el calor transferido que la variación de la temperatura de entrada del fluido caloportador, como arrojan los resultados mostrados en el Capítulo anterior.

Es reseñable el hecho de que los parámetros que más influencia causan en el tiempo de saturación del terreno son la geometría y propiedades del mismo, quedando lejos de la importancia relativa del caudal másico y temperatura de entrada. De esta manera, el aumento de 21 metros en la profundidad de operación, para el área en planta descrita, origina un incremento de 700 horas en la absorción térmica en las condiciones anteriormente establecidas.

En la Tabla 3 se puede observar el tiempo de colmatación del terreno, al duplicarse y reducirse a la mitad las variables mostradas en la primera columna.

Característica	Mitad	Caso base	Doble
Longitud de tubos	250	225	130
Diámetro de tubos	160	225	420
Número de tubos	240	225	200

Tabla 3.- Tiempo de saturación (en horas) para variación distintas magnitudes (I).

La tabla anterior pone de manifiesto que el incremento de la longitud de los tubos enterrados es la variable, sobre la geometría del banco de tubos, que más influencia ejerce sobre el tiempo de saturación térmica del terreno, y consecuentemente, sobre la energía térmica transferida, resultando el decremento del diámetro la segunda modificación en lo que a importancia relativa se refiere.

Se puede observar cómo, el número de tubos es la variable que menor efecto causa al terreno, debido a que al duplicar el número de tubos, la velocidad se reduce, compensando el aumento de transferencia térmica originado por el incremento del área de transferencia. La reducción de la velocidad origina una disminución del coeficiente de película debido a que $h \sim Re^{4/5}$, que conlleva una reducción en la transferencia de calor.

Respecto de las otras tres magnitudes analizadas, se pueden extraer los resultados numéricos reflejados en la Tabla 4.

Característica	Mitad	Caso base	Doble
Gasto másico	375	225	160
T ^a de entrada	205	225	230
Volumen de terreno	48	225	1650

Tabla 4.- Tiempo de saturación (en horas) para variación distintas magnitudes (II).

Observando los valores numéricos expuestos en la Tabla 4 se puede concluir que el volumen de terreno es la variable que mayor efecto causa sobre el tiempo necesario para saturar térmicamente el mismo. Esto es debido a que la inercia térmica es el parámetro más influyente en el almacenamiento térmico en terrenos. Lo anterior es consecuente con el hecho de que a mayor masa disponible para el almacenamiento térmico, mayor es el tiempo necesario para su saturación.

Visto de otro modo, la variable que menor efecto causa sobre el terreno es la temperatura de entrada, lo cual es claramente identificable al hecho de que las fluctuaciones térmicas del fluido de entrada son rápidamente alcanzadas por el terreno, resultando prácticamente invariante el tiempo necesario para su saturación, como se puede observar en las representaciones gráficas de dicha variable.

Para concluir, cabe citar la evidencia de que el tiempo de residencia del fluido caloportador en el interior del sistema de tubos enterrados es inversamente proporcional a la temperatura con la que alcanza el colector de salida. Esto es, para conseguir un mayor aprovechamiento energético del fluido que entra al terreno se debe aumentar el tiempo de residencia o lo que es similar, incrementar la longitud de los conductos. Por otro lado, para extraer el fluido de trabajo a menor temperatura se puede decrementar el diámetro de las tuberías con un resultado aceptable. Como aspecto negativo se puede mencionar que, la eficiencia del intercambio obtenida al decrementar el diámetro es menor que la resultante de incrementar la longitud de las conducciones. Lo cual radica en el hecho de que, al disminuir el diámetro se provoca una reducción del área de transferencia, penalizando ligeramente el intercambio térmico.

4.2 Fichero de carga disipada en el condensador.

Seguidamente, se ha resuelto el sistema de ecuaciones aplicándole varios ficheros de carga térmica, de edificios reales, que es necesaria disipar en el condensador para el correcto funcionamiento de la instalación frigorífica.

El esquema de funcionamiento de este modo de simulación es el mostrado en la Figura 53.

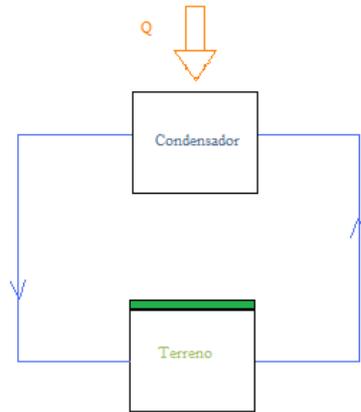


Figura 53.- Esquema de funcionamiento.

Las propiedades del terreno, del emparrillado de tubos y del fluido caloportador han sido modificadas respecto del caso anterior para dotar de mayor realismo al modelo, y son las que se muestran seguidamente.

- Localidad. Sevilla
 - Temperatura media: 18.6 °C [7]
- Propiedades del terreno.
 - Densidad: 2 000 kg/m³
 - Calor específico: 800 J/(kg·°C)
 - Volumen Edificio Aster: 19x96x9 m³
 - Volumen Edificio Cargas Andalucía: 26x54x7.5 m³
- Disposición del emparrillado de tubos.
 - Paralelo horizontal con retorno directo
 - Numero de tubos: 20
 - Longitud de tubos: 30 m.
 - Diámetro de tubos: 5 cm.
- Gasto másico de agua.
 - Edificio Aster: 142 kg/s
 - Edificio Cargas Andalucía: 26 kg/s

4.2.1 Edificio Aster.

Bajo las anteriores consideraciones, el vector de carga proporcionado es el mostrado en la Figura 54.

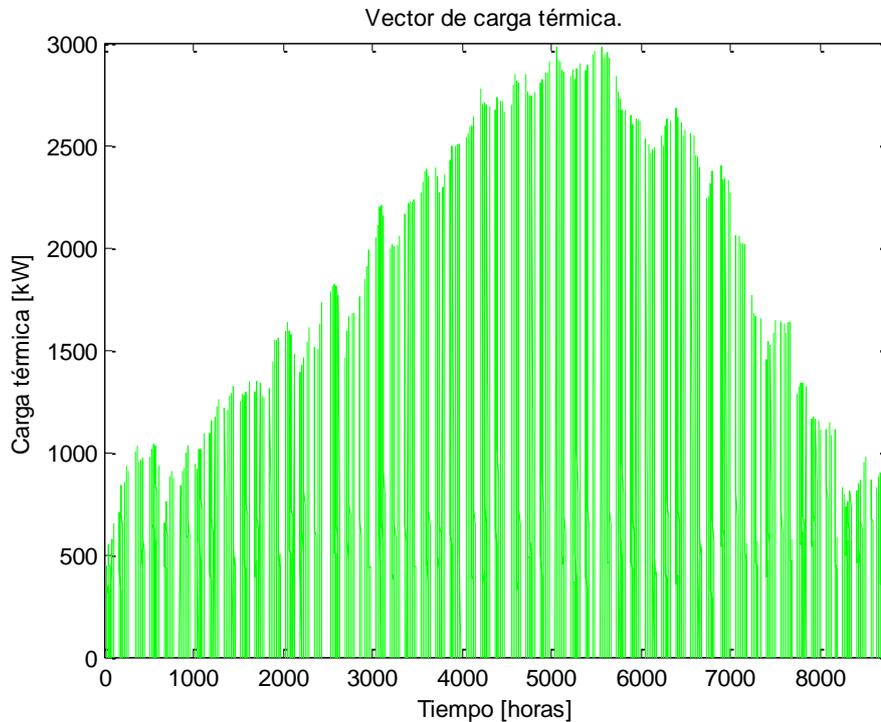


Figura 54.- Evolución carga condensador. Aster.

Como hipótesis de partida se ha supuesto que el fluido caloportador (para el que se han considerado las propiedades termofísicas del agua) no tiene punto de ebullición por encontrarse adecuadamente presurizado para tal efecto. Esta suposición no es del todo cierta, ya que la presión a la que debe verse sometido el fluido para no evaporarse es muy elevada, y se debería haber tenido en cuenta a la hora del cálculo del coeficiente de película, hecho que no se ha considerado.

Parece evidente resaltar el hecho de que no se desea que la temperatura del terreno supere los 100 °C, puesto que ello originaría vaporizaciones localizadas del agua contenida en su interior, que podrían contribuir a la desestabilización del terreno como sólido rígido. Además, se produciría la variación de las propiedades del subsuelo en el caso de que el rango de evolución de temperatura del terreno fuera muy amplio.

Para evitar los fenómenos anteriormente comentados sería necesaria una refrigeración intermedia del terreno. Por simplicidad en el tratamiento numérico se ha obviado la refrigeración hasta su consideración en el apartado 4.2.3 de este documento.

Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras posteriores.

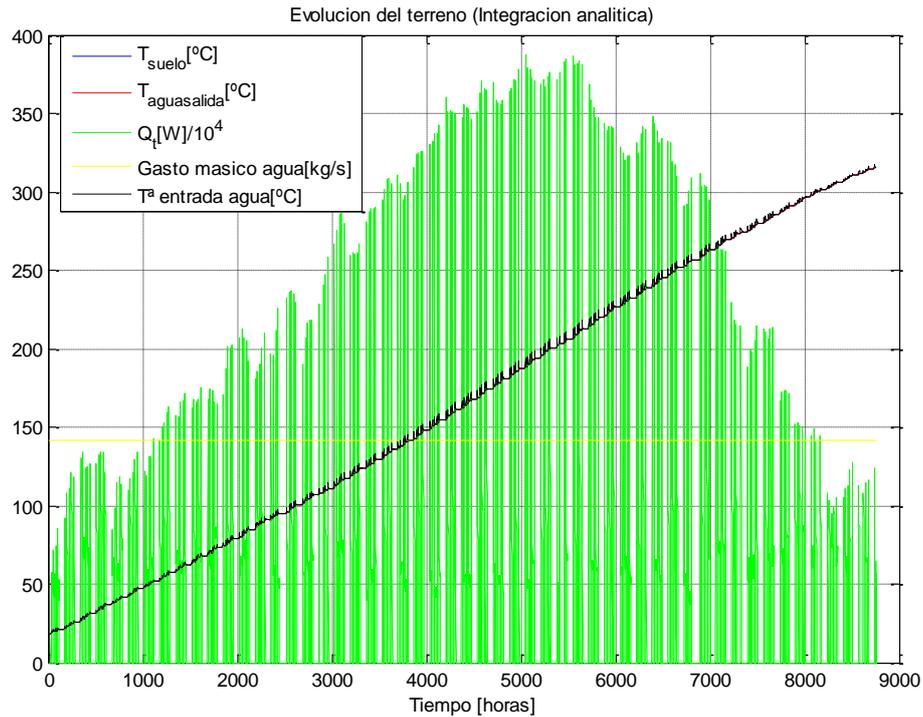


Figura 55.- Evolución térmica terreno. Aster.

Resaltando lo anteriormente destacado, el fluido caloportador y el terreno alcanzan los 300°C , lo cual no sería correcto debido a la no consideración de la transferencia térmica con un fluido en zona bifásica.

La energía térmica transferida puede observarse mejor en las Figura 56 y Figura 57.

En ellas, Q_{aster} representa la carga térmica cedida en el condensador, mientras que las distintas potencias térmicas intercambiadas que aparecen, representan la energía almacenada en el terreno, la cedida por convección al terreno y la perdida por el fluido caloportador a su paso por las tuberías enterradas en el terreno, respectivamente.

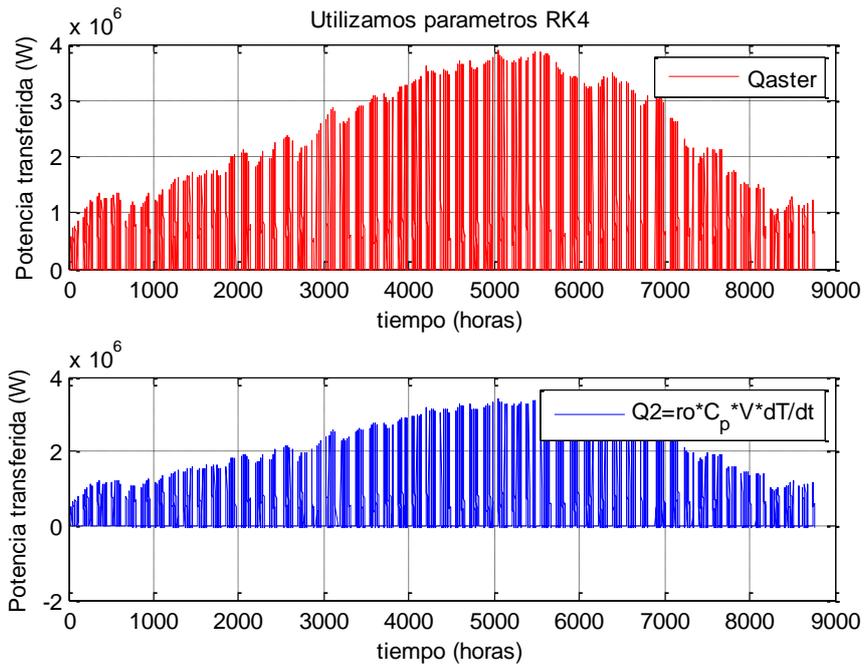


Figura 56.- Energía térmica intercambiada (I). Aster

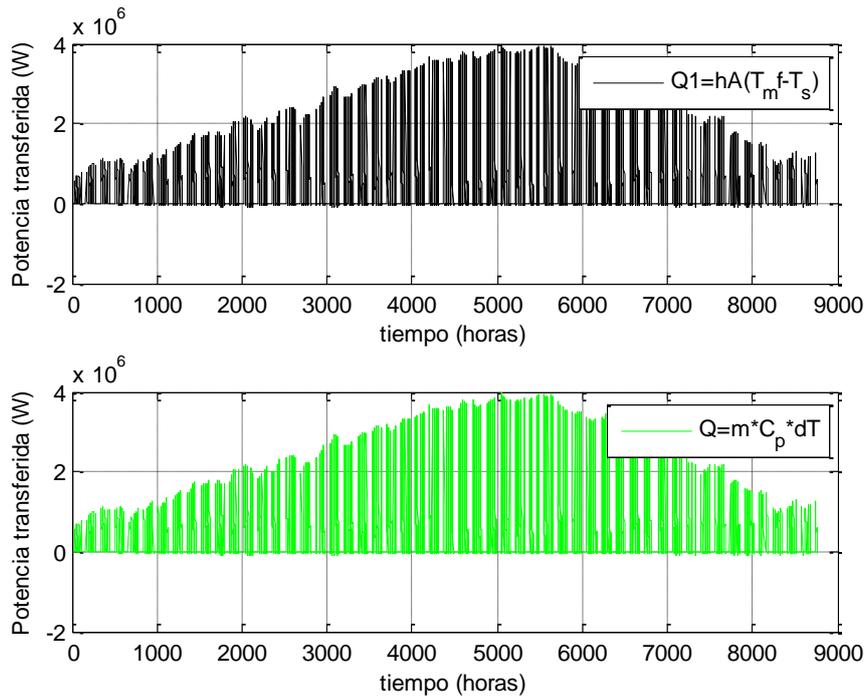


Figura 57.- Energía térmica intercambiada (II). Aster

Las anteriores curvas representan la energía térmica transferida desde el fluido caloportador hacia el terreno, mientras que para cerrar el balance térmico, es necesaria la determinación de la fracción de energía cedida por el condensador, invertida en elevar la temperatura del propio fluido de trabajo. Esta información es mostrada a modo de resumen en el siguiente esquema.

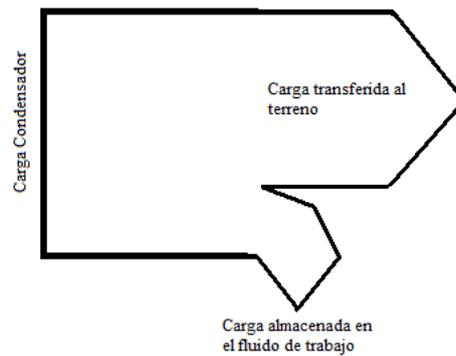


Figura 58.- Diagrama de Sankey del proceso.

La Figura 59 se corresponde con la carga térmica almacenada en el fluido caloportador, que en ocasiones es positiva, al incrementarse la temperatura del agua, y en otras ocasiones es negativa, al decrementarse la temperatura del fluido de trabajo. Esto es debido a que existen numerosas horas del año, en las cuales el condensador no está entregando potencia térmica, en los que Matlab comete pequeños errores en el tratamiento numérico que conducen a una reducción de la temperatura de salida, hecho que experimentalmente se despreciará por haber sido considerado el terreno como un sistema aislado.

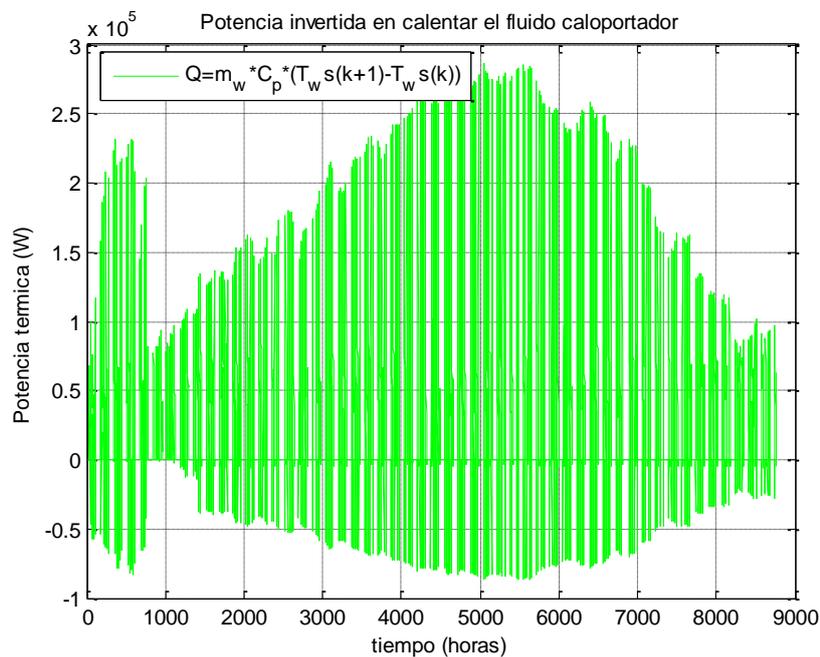


Figura 59.- Potencia disipada en fluido caloportador. Aster.

En resumen, la evolución de la temperatura del terreno a lo largo de todo el año es la mostrada en la Figura 60. En ella, se representa simultáneamente la solución obtenida por métodos numéricos y la obtenida a partir de la integración analítica de la ecuación diferencial.

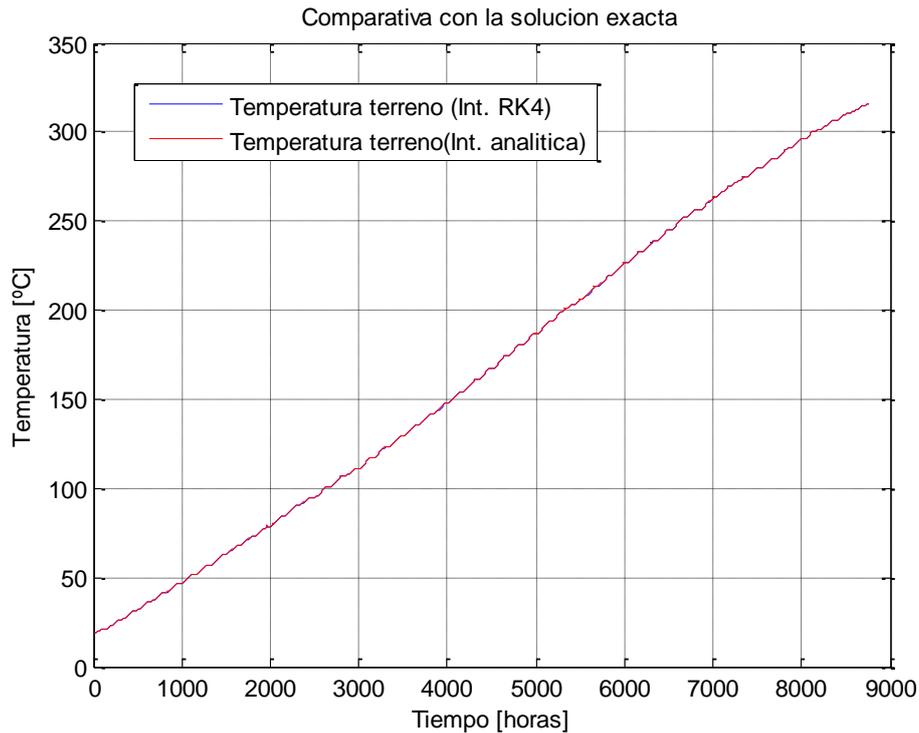


Figura 60.- Integración analítica frente a numérica. Aster.

Como dato curioso, se puede destacar que la temperatura crece a tasa casi constante a lo largo de todo el año, debido a que la carga térmica se incrementa en los meses centrales del año, coincidiendo con valores elevados de la temperatura (mayor dificultad para la transferencia térmica).

4.2.2 Cargas Andalucía.

Para el total conocimiento de la situación es necesario comentar que el cálculo de carga se ha realizado simulando el edificio mediante la herramienta informática CALENER, validada por el Ministerio de Industria para tal fin.

El edificio analizado es de planta rectangular de 44 m x 16 m (704 m² por planta), situado centrado en su parcela agotando la zona utilizable que definen los retranqueos (5 metros por cada lindero). Está formado por cinco plantas sobre rasante (baja, primera, segunda, tercera y cuarta), y dos plantas bajo rasante que ocupan la totalidad de la parcela, cuyas dimensiones son 54 m x 26 m (1.404 m²), con orientación este-oeste. El uso del edificio es administrativo en todas las plantas sobre rasante, incluyendo la planta baja. Las dos plantas bajo rasante se utilizan como aparcamiento. El horario de funcionamiento del edificio es de 7 horas a 18 horas los días laborables, permaneciendo cerrado los fines de semana [6].

Ahora se procede de forma similar al capítulo anterior pero con otro fichero de carga que tiene la evolución que se detalla en la Figura 61.

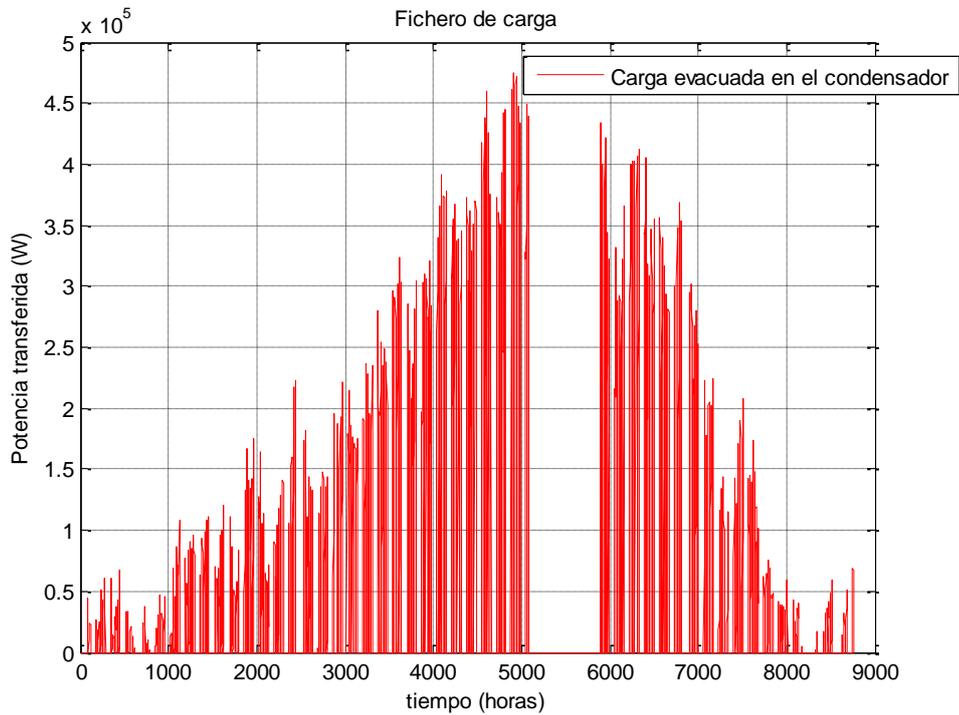


Figura 61.- Evolución carga condensador. Andalucía.

La evolución que experimenta el terreno es la siguiente.

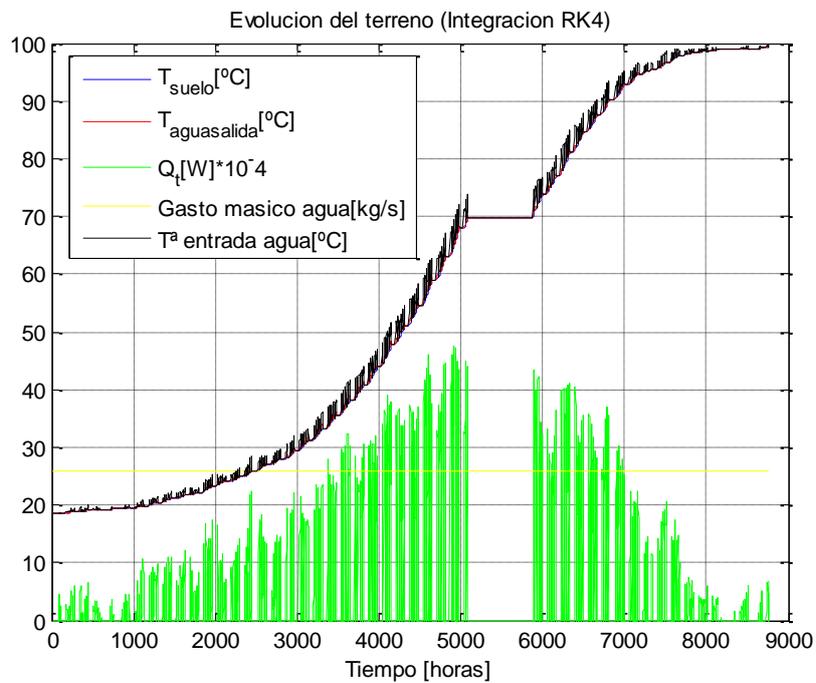


Figura 62.- Evolución térmica del terreno. Andalucía.

Se observa que la temperatura acumulada del terreno, al cabo de las 8760 horas con las que cuenta el año, se ubica alrededor de los 100 °C.

También se puede destacar que la temperatura del terreno se mantiene constante en la franja horaria en la que no se aporta carga térmica desde el condensador.

Desde el punto de vista de la eficiencia de la transferencia energética, se deberían combinar ciclos de carga con otros de descarga térmica del terreno, para evitar que se alcancen temperaturas elevadas que penalicen la transferencia térmica

En las siguientes figuras se ilustra la transferencia de energía, sucedida durante las distintas horas del año.

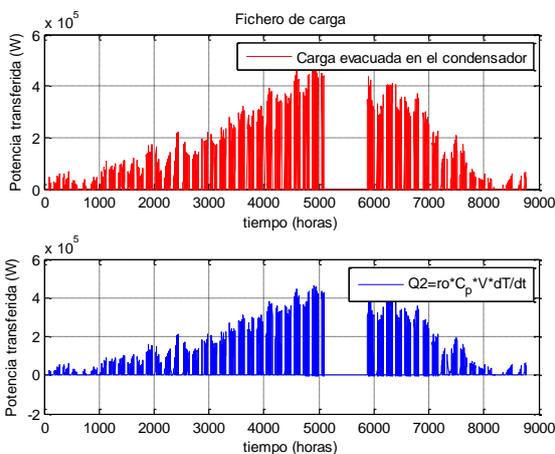


Figura 64.- Calor transferido al terreno (I). Andalucía.

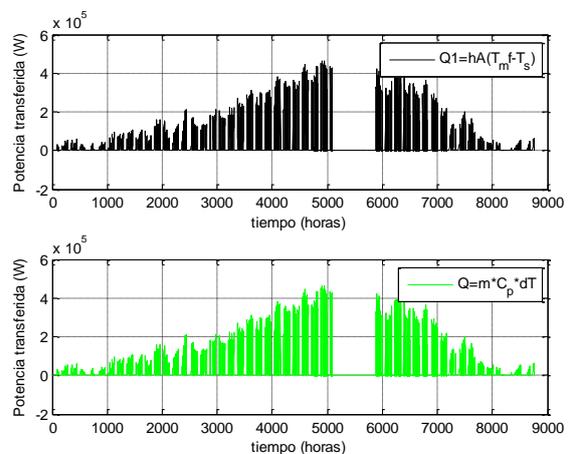


Figura 63.- Calor transferido al terreno (II). Andalucía.

Si se esboza la energía térmica almacenada en el fluido caloportador necesaria para cuadrar el balance térmico en el sistema, resulta lo siguiente.

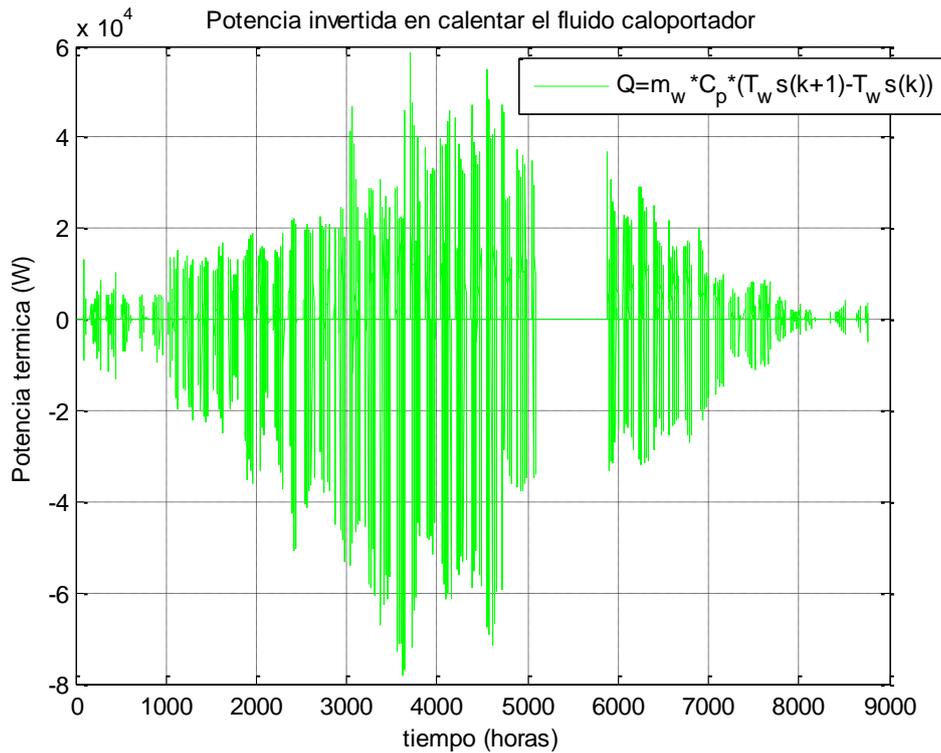


Figura 65.- Potencia disipada en fluido caloportador. Andalucía.

Los motivos para el caso de las potencias negativas discutidos en el apartado anterior son válidos para esta situación.

Por último, se muestra la evolución de la temperatura del terreno resultante de la integración utilizando un método de Runge-Kutta de orden 4, conjuntamente con la solución analítica de la ecuación diferencial.

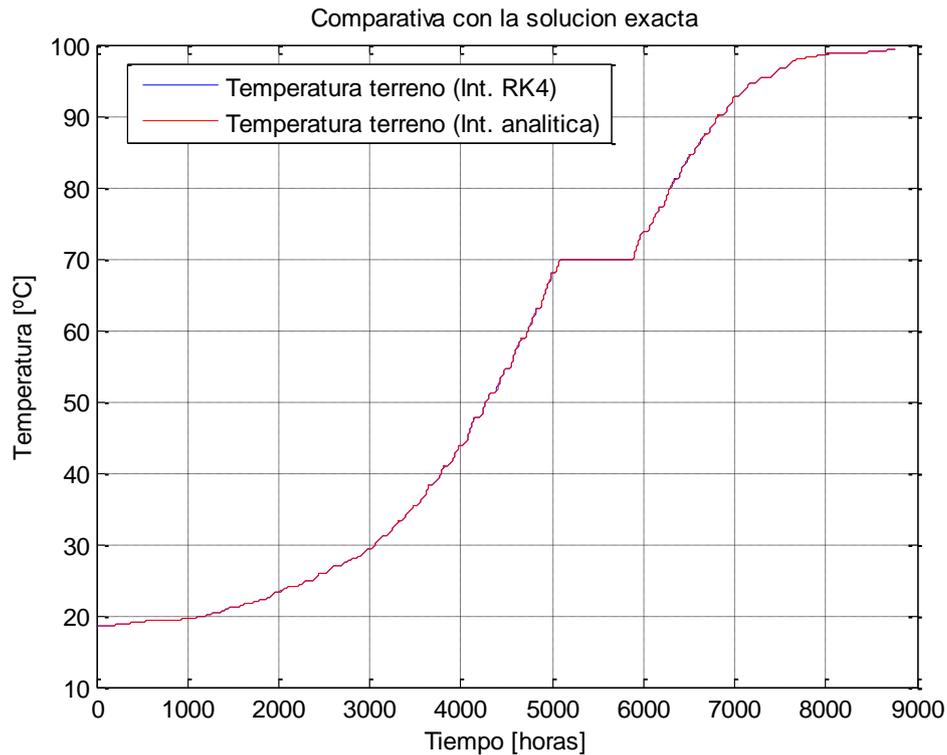


Figura 66.- Integración analítica frente a numérica. Andalucía.

Se puede observar cómo el método de Runge-Kutta de orden 4 se ajusta perfectamente a la solución exacta.

4.2.3 Vector de carga con refrigeración intermedia.

En este apartado se analizará el efecto de etapas de refrigeración o descarga térmica del terreno en intervalos en los que el condensador no se encuentre cediendo energía térmica.

Para dotar de mayor realismo al modelo, se procederá a refrigerar el terreno para evitar que tanto la temperatura del fluido caloportador como del terreno sobrepasen los 30 °C.

Se ha supuesto como temperatura máxima alcanzable por el terreno, la que asegure un correcto intercambio de energía térmica en el condensador entre el fluido caloportador y el refrigerante del ciclo termodinámico de refrigeración. Esto es debido a que el foco caliente se encuentra a 40 °C (refrigerante condensando en el condensador).

▪ Edificio Aster.

Como se detalla en los resultados del Capítulo 4.2.1 de este documento, la temperatura del fluido caloportador supera los 300 °C, algo que no es viable si deseamos trabajar con el refrigerante más común en la Tierra, el agua.

Para no complicar en demasía el tratamiento numérico, se introducirá una carga constante de refrigeración algo superior a la potencia media horaria cedida por el condensador, en los intervalos temporales en los cuales el condensador no trabaje.

Se impondrá una refrigeración constante de 380 KW intercambiados contra una fuente térmica con el gasto másico y salto de temperaturas adecuado.

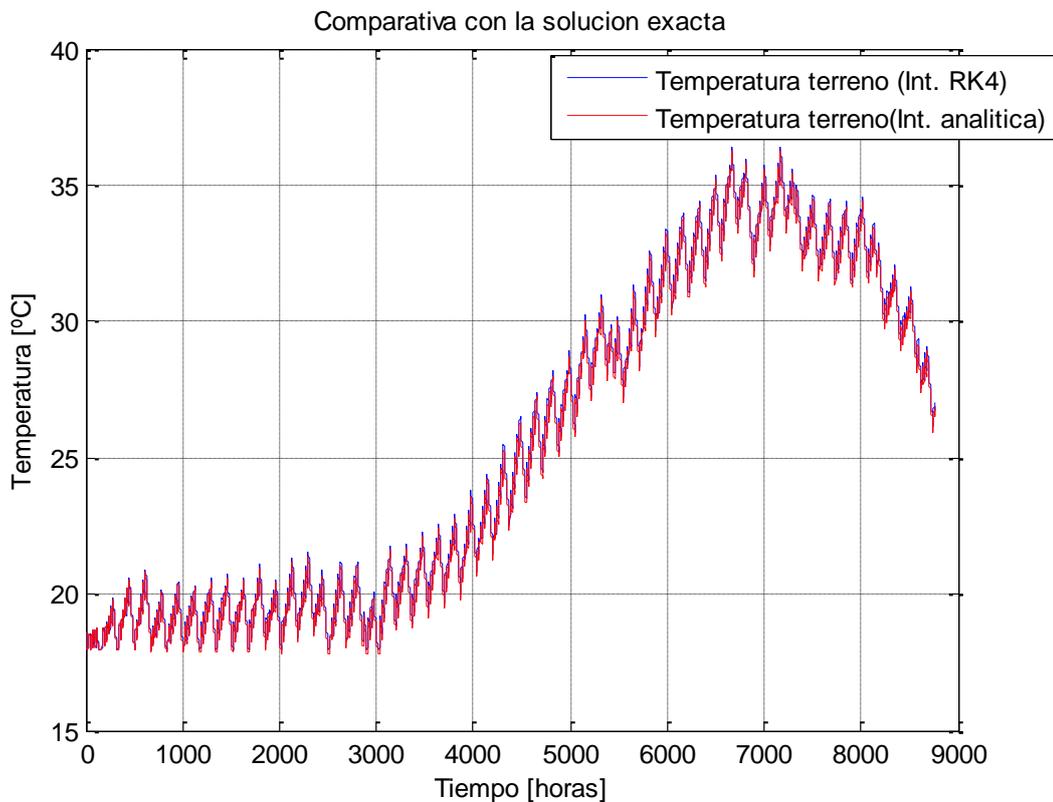


Figura 67.- Integración analítica frente a numérica. Refrigeración intermedia Aster.

Como puede observarse en la Figura 67, la carga de refrigeración no se puede considerar constante, ésta debe ser función de la temperatura alcanzada por el terreno, ya que en caso contrario la temperatura del mismo descendería respecto de la temperatura de partida en los instantes iniciales. Esta etapa de refrigeración ha de ser controlada por un sistema de control diseñado para que, en función de la temperatura del subsuelo, la bomba del circuito de refrigeración proporcionase un caudal variable con el objetivo de satisfacer los requerimientos térmicos de desaturación del terreno. En concreto, en este caso se ha refrigerado el terreno cuando su temperatura supera los 18 °C.

Físicamente, este modo de descarga térmica del terreno se encuentra muy condicionado por las fuentes de enfriamiento necesarias en lo que a caudal másico y temperatura del foco frío se refiere. Por ejemplo, se podría tomar agua a 15 °C de algún lago o río próximo y mediante el sistema de control variar el caudal másico introducido en la instalación. Para hacerse una idea, es posible conseguir una refrigeración de 380 kW con un salto térmico de agua de 15 °C a 22 °C, moviendo caudal másico de 12.9 kg/s, o lo que es similar, 46.6 m³/h.

Por último, es destacable que la eficiencia del condensador será tanto menor cuanto más reducido sea el “*pinch point*” (menor diferencia de temperaturas entre las corrientes caliente y fría). En el caso anterior, el intercambio energético se habrá efectuado con la menor eficiencia alrededor de la hora 7 000 del año. Como aspecto tecnológico, se podría reseñar que si se desease un aumento de la eficiencia de la transferencia energética en el condensador, podría refrigerarse el terreno en mayor medida. Como inconvenientes habría de remarcar el consumo eléctrico en bombas y la disponibilidad de utilidades frías. Esto no es detallado en este documento, ya que queda fuera del alcance del Proyecto.

- **Edificio Cargas Andalucía.**

En este apartado, se lleva a cabo un procedimiento similar al de la sección anterior. La única diferencia es que en este caso ha sido necesario aplicar menos carga de refrigeración puesto que el terreno apenas alcanza los 100 °C, en condiciones normales sin refrigeración.

La carga térmica media que es necesario disipar, por hora, en el condensador, para el correcto funcionamiento de la instalación de climatización, ronda los 33 kW. Por ello, aplicando 80 kW de refrigeración se alcanza el objetivo requerido. Intercambiar esta potencia térmica supone un salto térmico del agua de 22 °C a 15 °C, haciéndose circular 2.7 kg/s o 9.8 m³/h.

El resultado es el mostrado en la Figura 68, de manera que el terreno ha sido refrigerado para temperaturas superiores a 18 °C, ya que si se efectúa la refrigeración para todo instante de tiempo donde el condensador se encuentra parado, el terreno alcanza temperaturas inferiores a 5 °C.

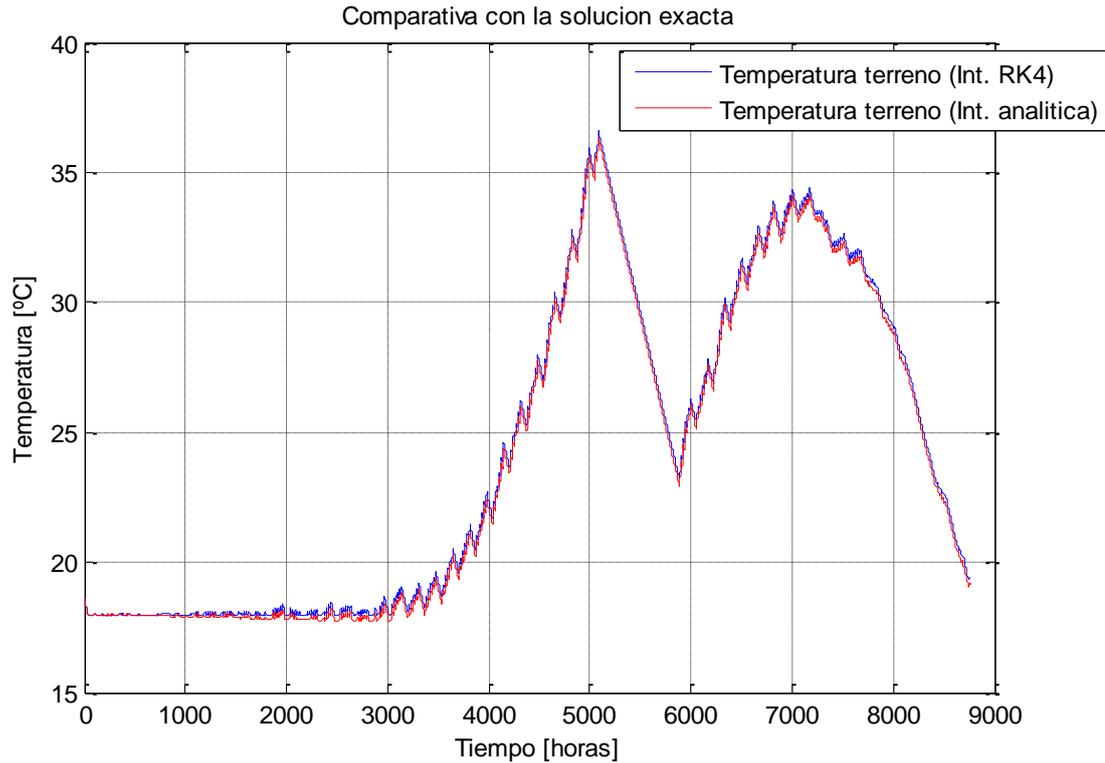


Figura 68.- Integración analítica frente a numérica. Refrigeración intermedia Andalucía.

Como se observa en la representación anterior, la temperatura del terreno supera ligeramente los 35 °C con el sistema de control descrito. En las horas centrales del año, la eficiencia del condensador será la menor anual, debido al menor salto térmico existente entre las utilidades fría y caliente. Por las razones contrarias a las expuestas anteriormente, la eficiencia del condensador será mayor el resto del año.