

Índice de contenido

0. Introducción.....	1
1. Objetivos.....	8
2. Estado del arte.	10
2.1 Intercambio Tierra-Aire.....	10
2.2 Intercambio Tierra-Fluido Caloportador.	13
2.2.1 Circuito cerrado.	13
2.2.2 Circuito abierto.	25
2.3 Instalaciones existentes en la actualidad.....	27
3. Descripción del Modelo.....	32
3.1 Conducción en terreno como sistema de capacidad.	32
3.1.1 Determinación del coeficiente de película.....	34
3.2 Conducción en terreno con gradiente térmico interno.....	36
4. Aplicaciones.	39
4.1 Temperatura de entrada constante.	39
4.1.1 Análisis de sensibilidad.	41
4.1.2 Resultados y tendencias de interés.	54
4.2 Fichero de carga disipada en el condensador.....	56
4.2.1 Edificio Aster.....	58
4.2.2 Cargas Andalucía.....	62
4.2.3 Vector de carga con refrigeración intermedia.	66
5. Análisis comparativo entre conducción en régimen transitorio y como sistema de capacidad.	70
5.1 Modelo bajo hipótesis de sistema de capacidad.	72
5.2 Modelo supuesto gradiente térmico en interior del terreno.	72

5.3 Comparativa entre los casos anteriores.....	77
6. Conclusiones.....	83
Bibliografía.....	86
Anexo 1.- Código Matlab.	88
Anexo 2.- Valores climatológicos. Aeropuerto de Sevilla.	101

Índice de figuras

Figura 1.- Ciclo de compresión mecánica.	1
Figura 2.- Torre de refrigeración.	4
Figura 3.- Torre de tiro inducido.	5
Figura 4.- Torre de tiro forzado.	5
Figura 5.- Distribución temperaturas en el subsuelo en distintas épocas del año.	6
Figura 6.- Sistema de tubos enterrados.	8
Figura 7.- Pozo provenzal en régimen de invierno y verano [8].	12
Figura 9.- Red horizontal doble [2].	14
Figura 8.- Red horizontal simple [2].	14
Figura 10.- Red horizontal serie [2].	15
Figura 11.- Red horizontal serie [2].	15
Figura 12.- Red horizontal retorno directo [2].	16
Figura 13.- Red horizontal retorno inverso [2].	16
Figura 14.- Esquema red horizontal alimentación central.	17
Figura 15.- Integración en la edificación de red vertical [2].	18
Figura 16.- Red vertical disposición en serie [2].	18
Figura 17.- Integración en edificación.	19
Figura 18.- Integración en edificación.	20
Figura 19.- Red vertical paralelo [2].	20
Figura 20.- Tubos simple en U [12].	21
Figura 21.- Tubos doble en U [12].	21
Figura 22.- Tubos coaxial simple (a) y compuesto (b) [12].	22
Figura 23.- Intercambiador sumergido.	22
Figura 24.- Intercambiador Slinky.	23
Figura 25.- Sistema híbrido con intercambiador sumergido [19].	24
Figura 26.- Sistema híbrido con colector solar térmico [19].	24
Figura 27.- Sistema híbrido con torre de refrigeración [19].	25
Figura 28.- Inyección en circuito abierto [12].	26
Figura 29.- Campo de captación.	29

Figura 30 - GHE Daniel Boone High School [20].	30
Figura 31.- Bombas de calor geotérmicas en la Unión Europea [17]......	31
Figura 32.- Sección transversal bajo estudio.	36
Figura 33.- Vista lateral (a) y alzado (b) de la geometría de terreno [3].	37
Figura 34.- Flujos de energía en el terreno [12].	38
Figura 35.- Evolución terreno a T^a entrada cte.	40
Figura 36.- Flujo de calor transferido a T^a entrada cte.	41
Figura 37.- Análisis de sensibilidad. Decremento gasto másico.	42
Figura 38.- Análisis de sensibilidad. Incremento gasto másico.	43
Figura 39.- Análisis de sensibilidad. Incremento temperatura de entrada.....	44
Figura 40.- Análisis de sensibilidad. Decremento temperatura de entrada.	45
Figura 41.- Análisis de sensibilidad. Caso base longitud de conductos.	46
Figura 42.- Análisis de sensibilidad. Incremento longitud de conductos.	46
Figura 43.- Análisis de sensibilidad. Decremento longitud de conductos.	47
Figura 44.- Análisis de sensibilidad. Caso base diámetro de conductos.	48
Figura 45.- Análisis de sensibilidad. Decremento diámetro de conductos.....	49
Figura 46.- Análisis de sensibilidad. Incremento diámetro de conductos.	50
Figura 47.- Análisis de sensibilidad. Caso base número de conductos.	51
Figura 48.- Análisis de sensibilidad. Incremento número de conductos.	51
Figura 49.- Análisis de sensibilidad. Decremento número de conductos.....	52
Figura 50.- Análisis de sensibilidad. Caso base volumen de terreno.	53
Figura 51.- Análisis de sensibilidad. Incremento volumen de terreno.	53
Figura 52.- Análisis de sensibilidad. Decremento volumen de terreno.....	54
Figura 53.- Esquema de funcionamiento.	57
Figura 54.- Evolución carga condensador. Aster.	58
Figura 55.- Evolución térmica terreno. Aster.	59
Figura 56.- Energía térmica intercambiada (I). Aster.....	60
Figura 57.- Energía térmica intercambiada (II). Aster	60
Figura 58.- Diagrama de Sankey del proceso.....	61
Figura 59.- Potencia disipada en fluido caloportador. Aster.	61
Figura 60.- Integración analítica frente a numérica. Aster.	62
Figura 61.- Evolución carga condensador. Andalucía.....	63
Figura 62.- Evolución térmica del terreno. Andalucía.	63
Figura 63.- Calor transferido al terreno (I). Andalucía.....	64

Figura 64.- Calor transferido al terreno (II). Andalucía.	64
Figura 65.- Potencia disipada en fluido caloportador. Andalucía.	65
Figura 66.- Integración analítica frente a numérica. Andalucía.	66
Figura 67.- Integración analítica frente a numérica. Refrigeración intermedia Aster.	67
Figura 68.- Integración analítica frente a numérica. Refrigeración intermedia Andalucía.	69
Figura 69.- Vista en planta. Geometría simulada.	71
Figura 70.- Vista en 3D de la geometría considerada.	71
Figura 71.- Evolución térmica del terreno supuesto sistema de capacidad.	72
Figura 72.- Curvas de isoterma de temperatura alzado (instante inicial).	73
Figura 73.- Evolución térmica del terreno en altura (instante inicial).	73
Figura 74.- Curvas de isoterma de temperatura alzado (12 horas).	74
Figura 75.- Evolución térmica del terreno en altura (12 horas).	74
Figura 76.- Curvas de isoterma de temperatura alzado (24 horas).	75
Figura 77.- Evolución térmica del terreno en altura (24 horas).	75
Figura 78.- Densidad de flujo de calor [W/m^2] a las 24 horas.	76
Figura 79.- Densidad de flujo de calor [W/m^2] a las 12 horas.	76
Figura 80.- Densidad de flujo de calor [W/m^2] en el instante inicial.	77
Figura 81.- 80 horas de cesión térmica ininterrumpida.	79
Figura 82.- 250 horas de cesión térmica ininterrumpida.	80
Figura 83.- 500 horas de cesión térmica ininterrumpida.	80
Figura 84.- Temperatura agua salida a las 12 horas (SC).	82

Índice de Tablas

Tabla 1.- Instalaciones existentes en la actualidad [15] [16] [17] [18] [19] [20]	27
Tabla 2.- Evolución de las propiedades del agua con la temperatura [11].	35
Tabla 3.- Tiempo de saturación (en horas) para variación distintas magnitudes (I).	55
Tabla 4.- Tiempo de saturación (en horas) para variación distintas magnitudes (II).	55
Tabla 5.- Comparativa densidad flujo de calor.	78
Tabla 6.- Temperatura salida agua. Comparativa.	81