

Álvaro Rodríguez Almaraz

**Sistemas de climatización de bajo impacto ambiental
para invernaderos**

**Trabajo Fin de Máster
dirigido por el Dr. Joan Manel Vallès Rasquera**

Máster en Ingeniería Industrial



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2017

RESUMEN

En los últimos años hemos asistido a un gran avance en los cultivos bajo plástico, especialmente en las técnicas de cultivo y en las mejoras del vegetal, pero estos avances no se han visto traducidos hasta las fechas recientes en una mejora de las estructuras y el control climático debido a los altos costes de renovación de las estructuras. Por ello este proyecto se orienta en esta tendencia de mejora continua en invernaderos, proponiendo la incorporación de sistemas de climatización en los invernaderos para conseguir condiciones más favorables para el cultivo.

El siguiente paso que se persigue es conseguir métodos de climatización sostenibles, los cuales no solo reduzcan las emisiones de CO₂, sino que sean viables económicamente, teniendo en cuenta los altos precios de la electricidad que encarecerían el coste de producción y provocarían una disminución de la competitividad del producto.

En definitiva, mediante este proyecto se pretende contribuir al desarrollo de métodos de climatización para invernaderos de bajo impacto ambiental y reducido consumo eléctrico. Para ello se analizan dos posibles alternativas, una activa basada en intercambiadores de calor tierra-aire, y otra pasiva basada en materiales de cambio de fase.

Con tal propósito se realizará un modelo detallado de un invernadero en la zona de Almería utilizando Trnsys como herramienta de simulación para comprobar la viabilidad de este tipo de equipos. Se estudiarán las demandas de calor o frío a lo largo de un ciclo productivo y la eficiencia del equipo a instalar. El estudio se centrará sobretodo en el periodo invernal que es la época productiva de mayor rentabilidad económica. Para las dos soluciones propuestas se analizará la capacidad de control de la temperatura mínima y se dimensionarán los equipos para evitar que la temperatura en el interior del invernadero se sitúe por debajo de los 8 °C.

Tras realizar diversas configuraciones de los equipos, se estudian las que permiten mantener durante todo el año una temperatura superior a los 8°C, buscando una optimización del consumo energético mediante aquellos equipos con mayor COP.

En el caso de las placas de PCM, de no poder asegurar una temperatura siempre superior a los 8°C se evaluaría el número de horas que se está por debajo de esta y las temperaturas conseguidas, para conocer el potencial de esta opción.

Ambas opciones serán presupuestadas y se proyectará el coste económico de estas contra los sistemas tradicionales de climatización para determinar si realmente estos nuevos métodos son viables.

Índice general

Índice de la memoria

1	Introducción.....	3
1.1	Objeto.....	3
1.2	Consideraciones previas de los invernaderos.....	3
1.2.1	Características invernaderos mediterráneos.....	3
1.2.2	Invernaderos típicos almerienses.....	4
1.2.3	Tipos de cultivos.....	6
1.3	Condicionantes.....	9
1.3.1	Condicionantes climáticos para producción.....	9
1.3.2	Condicionantes del entorno físico.....	10
1.4	Situación actual.....	10
1.4.1	Descripción del problema a resolver.....	10
1.4.2	Descripción de sistemas actuales utilizados.....	10
1.4.3	Estudios invernaderos Almería.....	12
1.4.4	Modelo de los flujos energía interactuantes.....	13
1.5	Sistemas de climatización considerados.....	14
1.5.1	Intercambiadores tierra-aire (EAHE).....	14
1.5.2	Materiales de cambio de fase (PCMs).....	16
2	Objetivos.....	20
3	Creación modelo invernadero.....	21
3.1	Diseño geometría invernadero mediante "Sketch Up".....	21
3.1.1	Importación a TRNSYS 17.....	22
3.2	Etapas del cultivo.....	22
3.3	Materiales.....	23
3.3.1	Tipos de cubiertas.....	23
3.3.2	Creación de materiales en la biblioteca.....	23
3.3.3	Propiedades del material obtenido.....	26
3.4	Ventilación.....	26
3.4.1	Ventilación natural.....	26
3.5	Cargas térmicas.....	28
3.5.1	Radiación neta.....	29
3.5.2	Calor sensible perdido por renovación de aire.....	29
3.5.3	Intercambio de calor con el suelo.....	29
3.5.4	Calor perdido por conducción-convección.....	30

3.5.5	Calor latente consumido en la evapotranspiración de las plantas.....	30
3.5.6	Energía calorífica a aportar o eliminar en el invernadero.....	30
3.6	Comparación efecto evapotranspiración	30
3.7	Optimización mediante técnicas pasivas	32
3.7.1	Modelo 1.....	34
3.7.2	Modelo 2.....	36
3.7.3	Modelo 3.....	38
3.8	Análisis de los diversos modelos	38
4	Modelo con intercambiador tierra-aire (EAHE)	40
4.1	Energía calorífica a aportar o eliminar en el invernadero	41
4.2	Cálculo de la pérdida de carga.....	41
4.2.1	Colector	42
4.2.2	Tubos	42
4.2.3	Accesorios.....	42
4.2.4	Caída de presión total	42
4.3	Estudio de las diversas disposiciones y velocidades	42
4.4	Análisis de los diversos modelos	45
5	Estudio con sistema de climatización alternativo	48
6	Modelos con placas de PCM	50
6.1	Distribución placas de PCM.....	50
6.2	Estudio con los diversos tipos de placas considerados.....	51
6.2.1	Modelo 1. PCM de 18°C.....	54
6.2.2	Modelo 2. PCM de 11°C.....	55
6.2.3	Modelo 3. PCM de 9°C.	57
6.2.4	Modelo 4. PCM de 8°C.	58
6.3	Análisis de los diversos modelos	59
7	Modelo con placas PCM y bomba de calor	61
7.1	Placas PCM de 9°C con bomba de calor.....	61
7.2	Placas PCM de 11°C con bomba de calor.....	62
8	Análisis emisiones de CO ₂	63
9	Resumen de presupuesto para las diversas opciones	65
9.1	Presupuesto con tubos AWADUKT Thermo de Rehau.....	65
9.2	Presupuesto con tubos normales	65
9.3	Presupuesto bomba de calor	65
9.4	Presupuesto placas PCM	65
10	Estudio económico	66
10.1	Viabilidad económica EAHE con tubos AWADUKT Thermo.....	66
10.2	Viabilidad económica EAHE con tubos "normales"	67

10.3 Viabilidad económica de los PCM	67
11 Conclusiones	69
12 Referencias	71

Índice del anexo de justificaciones del modelo invernadero

1	Complemento creación modelo invernadero	2
1.1	Cargas térmicas	2
1.1.1	Intercambio de calor con el suelo	2
1.1.2	Radiación absorbida por el suelo y las plantas	3
1.1.3	Ganancia interna por ocupación	7
1.1.4	Ganancia efecto cultivo. Evapotranspiración	8
1.1.5	Comprobación resultados evapotranspiración	13
2	Optimización mediante técnicas pasivas.....	19
2.1	Modelo 1	19
2.2	Modelo 2	22
2.3	Modelo 3	25
3	Análisis de los diversos modelos.....	29

Índice del anexo de justificaciones del EAHE

1	Hipótesis y consideraciones del EAHE	2
2	Parámetros de los tubos seleccionados	4
2.1	Disposición seleccionada	4
2.2	Tipo de tubo seleccionado.....	5
2.2.1	Tubos para verano e invierno.....	5
2.2.2	Tubos solo para invierno	6
2.2.3	Elementos auxiliares	6
2.3	Profundidad del terreno	7
2.4	Cálculo ΔP del ventilador.....	9
3	Modelos considerados con el EAHE.....	11
3.1	Modelo 1. 38 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.25m con velocidad 5m/s 11	
3.2	Modelo 2. 23 tubos de 38 metros de longitud y diámetro 0.25m con velocidad 5m/s 13	
3.3	Modelo 3. 38 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.25m con velocidad 1m/s 15	
3.4	Modelo 4. 23 tubos de 38 metros de longitud y diámetro 0.25m con velocidad 1m/s 16	
3.5	Modelo 5. 15 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.63m con velocidad 3m/s 17	
3.6	Modelo 6. 4 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.63m con velocidad 5m/s 20	
3.7	Modelo 7. 8 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.63m con velocidad 5m/s 22	
3.8	Modelo 8. 8 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.63m con velocidad 4m/s 23	
3.9	Modelo 9. 8 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.63m con velocidad 3m/s 25	
4	Análisis de los diversos modelos.....	27

Índice del anexo de justificaciones del modelo con PCM

1	Distribución placas de PCM	2
2	Modelos considerados	3
2.1	Modelo 1. PCM de 18°C	3
2.2	Modelo 2. PCM de 11°C	7
2.3	Modelo 3. PCM de 9°C.....	10
2.4	Modelo 4. PCM de 8°C.....	14
3	Análisis de los diversos modelos.....	18

Índice del anexo de descripción de los types

1	Ecuación	6
2	Weather data	7
2.1	Outputs destacados.....	7
2.1.1	Temperatura ambiente.....	7
2.1.2	Temperatura del cielo	7
2.1.3	Humedad relativa	7
2.1.4	Presión atmosférica.....	7
2.1.5	Angulo del zenit solar.....	7
2.1.6	Angulo del azimut solar	7
2.1.7	Radiación total para la superficie estipulada	7
2.1.8	Radiación total en la superficie indicada.....	7
2.1.9	Radiación horizontal de onda corta.....	7
2.1.10	Radiación de onda corta en la superficie indicada.....	8
2.1.11	Angulo de incidencia horizontal.....	8
2.1.12	Angulo de incidencia en la superficie indicada	8
2.1.13	Día del año	8
2.1.14	Reflectancia del suelo	8
3	Type 56	9
3.1	Inputs	9
3.1.1	Temperatura ambiente.....	9
3.1.2	Humedad relativa	9
3.1.3	Temperatura del cielo	9
3.1.4	Temperatura del cielo	9
3.1.5	Angulo del zenit solar.....	9
3.1.6	Angulo del azimut solar	9
3.1.7	Reflexión del suelo.....	9
3.1.8	Temperatura del suelo	9
3.1.9	Brillo.....	10
3.1.10	Evapotranspiración	10
3.1.11	Tasa de renovación.....	10
3.1.12	QType997	10
3.1.13	Caudal Type997	10
3.1.14	Temperatura Type997.....	10
3.1.15	RH Type997.....	10
3.1.16	Fp	10
3.2	Outputs.....	10

	3.2.1 T Air	10
	3.2.2 Q sens	11
	3.2.3 RH.....	11
	3.2.4 QSoltr	11
4	Type 517	12
5	Type 1502.....	13
	5.1 Parámetros.....	13
	5.1.1 Banda muerta.....	13
	5.1.2 Oscilaciones permitidas	13
	5.2 Inputs	13
	5.2.1 Temperatura del fluido.....	13
	5.2.2 Temperatura set-point	13
	5.3 Outputs.....	13
	5.3.1 Señal del controlador para calentamiento.....	13
6	Type 1503.....	14
	6.1 Parámetros.....	14
	6.1.1 Banda muerta.....	14
	6.1.2 Oscilaciones permitidas	14
	6.2 Inputs	14
	6.2.1 Temperatura del fluido.....	14
	6.2.2 Temperatura set-point	14
	6.3 Outputs.....	14
	6.3.1 Señal del controlador para calentamiento.....	14
7	Type 14h	15
8	Type 25d	16
9	Type 65a	17
10	Type 65d	18
11	Type 77	19
	11.1 Parámetros.....	19
	11.1.1 Temperatura media	19
	11.1.2 Amplitud de la temperatura de la superficie	19
	11.1.3 Tiempo de inicio	19
	11.1.4 Conductividad térmica del suelo.....	19
	11.1.5 Densidad del suelo	19
	11.1.6 Calor específico del suelo	19
	11.1.7 Profundidad del punto.....	19
	11.2 Outputs.....	20
	11.2.1 Temperatura del punto	20

12	Type 112b.....	20
	12.1 Parámetros.....	20
	12.1.1 Caudal másico.....	20
	12.1.2 Potencia.....	20
	12.1.3 Eficiencia del motor.....	20
	12.2 Inputs.....	20
	12.2.1 Temperatura del aire de entrada.....	20
	12.2.2 Humedad relativa.....	20
	12.2.3 Caudal másico de aire.....	20
	12.2.4 Señal de control.....	21
	12.2.5 Presión a la entrada.....	21
	12.3 Outputs.....	21
	12.3.1 Temperatura del aire de salida.....	21
	12.3.2 Humedad relativa.....	21
	12.3.3 Consumo energético.....	21
	12.3.4 Presión a la salida.....	21
13	Type 997.....	22
	13.1 Parámetros destacados.....	22
	13.1.1 Parámetros del intercambiador.....	22
	13.1.2 Parámetros del fluido de intercambio.....	23
	13.1.3 Parámetros del suelo.....	23
	13.2 Inputs.....	24
	13.2.1 Temperatura de entrada.....	24
	13.2.2 Caudal de entrada.....	24
	13.3 Outputs.....	25
	13.3.1 Temperatura del fluido de salida.....	25
	13.3.2 Ratio de energía liberado.....	25
	13.3.3 Caudal de salida.....	25
14	Type 33e.....	26
	14.1 Inputs.....	26
	14.1.1 Temperatura de bulbo seco.....	26
	14.1.2 Humedad relativa.....	26
	14.1.3 Presión.....	26
	14.2 Outputs.....	26
	14.2.1 Densidad del aire.....	26
15	Type 189.....	27
	15.1 Parámetros.....	27
	15.1.1 K.....	27

15.1.2	Densidad	27
15.1.3	Espesor	27
15.1.4	Cp sensible	27
15.1.5	Rango de fusión	27
15.1.6	Entalpia	27
15.1.7	T fusión	27
15.1.8	Nº placas	27
15.2	Inputs	28
15.2.1	T aire	28
15.3	Outputs	28
15.3.1	Q	28
15.3.2	T superficial	28

Índice de Presupuestos

1	Excavación con tubos AWADUKT Thermo.....	2
1.1	Cuadro de precios 1	2
1.2	Cuadro de precios 2	5
1.3	Presupuesto y mediciones.....	8
1.4	Resumen de presupuesto.....	11
2	Presupuesto con tubos normales.....	12
2.1	Cuadro de precios 1	12
2.2	Cuadro de precios 2	15
2.3	Presupuesto y mediciones.....	18
2.4	Resumen de presupuesto.....	21
3	Presupuesto bomba de calor.....	22
3.1	Cuadro de precios 1	22
3.2	Cuadro de precios 2	23
3.3	Presupuesto y mediciones.....	24
3.4	Resumen de presupuesto.....	25
4	Presupuesto placas PCM.....	26
4.1	Cuadro de precios 1	26
4.2	Cuadro de precios 2	27
4.3	Presupuesto y mediciones.....	28
4.4	Resumen de presupuesto.....	29

Álvaro Rodríguez Almaraz

**Sistemas de climatización de bajo impacto ambiental
para invernaderos**

**Trabajo Fin de Máster
dirigido por el Dr. Joan Manel Vallès Rasquera**

Máster en Ingeniería Industrial

Memoria



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2017

Índice de la memoria

1	Introducción.....	3
1.1	Objeto.....	3
1.2	Consideraciones previas de los invernaderos.....	3
1.2.1	Características invernaderos mediterráneos.....	3
1.2.2	Invernaderos típicos almerienses.....	4
1.2.3	Tipos de cultivos.....	6
1.3	Condicionantes.....	9
1.3.1	Condicionantes climáticos para producción.....	9
1.3.2	Condicionantes del entorno físico.....	10
1.4	Situación actual.....	10
1.4.1	Descripción del problema a resolver.....	10
1.4.2	Descripción de sistemas actuales utilizados.....	10
1.4.3	Estudios invernaderos Almería.....	12
1.4.4	Modelo de los flujos energía interactuantes.....	13
1.5	Sistemas de climatización considerados.....	14
1.5.1	Intercambiadores tierra-aire (EAHE).....	14
1.5.2	Materiales de cambio de fase (PCMs).....	16
2	Objetivos.....	20
3	Creación modelo invernadero.....	21
3.1	Diseño geometría invernadero mediante "Sketch Up".....	21
3.1.1	Importación a TRNSYS 17.....	22
3.2	Etapas del cultivo.....	22
3.3	Materiales.....	23
3.3.1	Tipos de cubiertas.....	23
3.3.2	Creación de materiales en la biblioteca.....	23
3.3.3	Propiedades del material obtenido.....	26
3.4	Ventilación.....	26
3.4.1	Ventilación natural.....	26
3.5	Cargas térmicas.....	28
3.5.1	Radiación neta.....	29
3.5.2	Calor sensible perdido por renovación de aire.....	29
3.5.3	Intercambio de calor con el suelo.....	29
3.5.4	Calor perdido por conducción-convección.....	30
3.5.5	Calor latente consumido en la evapotranspiración de las plantas.....	30
3.5.6	Energía calorífica a aportar o eliminar en el invernadero.....	30
3.6	Comparación efecto evapotranspiración.....	30

3.7	Optimización mediante técnicas pasivas	32
3.7.1	Modelo 1.....	34
3.7.2	Modelo 2.....	36
3.7.3	Modelo 3.....	38
3.8	Análisis de los diversos modelos	38
4	Modelo con intercambiador tierra-aire (EAHE)	40
4.1	Energía calorífica a aportar o eliminar en el invernadero	41
4.2	Cálculo de la pérdida de carga.....	41
4.2.1	Colector	42
4.2.2	Tubos	42
4.2.3	Accesorios.....	42
4.2.4	Caída de presión total	42
4.3	Estudio de las diversas disposiciones y velocidades	42
4.4	Análisis de los diversos modelos	45
5	Estudio con sistema de climatización alternativo	48
6	Modelos con placas de PCM	50
6.1	Distribución placas de PCM.....	50
6.2	Estudio con los diversos tipos de placas considerados.....	51
6.2.1	Modelo 1. PCM de 18°C.....	54
6.2.2	Modelo 2. PCM de 11°C.....	55
6.2.3	Modelo 3. PCM de 9°C.	57
6.2.4	Modelo 4. PCM de 8°C.	58
6.3	Análisis de los diversos modelos	59
7	Modelo con placas PCM y bomba de calor	61
7.1	Placas PCM de 9°C con bomba de calor.....	61
7.2	Placas PCM de 11°C con bomba de calor.....	62
8	Análisis emisiones de CO ₂	63
9	Resumen de presupuesto para las diversas opciones	65
9.1	Presupuesto con tubos AWADUKT Thermo de Rehau.....	65
9.2	Presupuesto con tubos normales	65
9.3	Presupuesto bomba de calor	65
9.4	Presupuesto placas PCM	65
10	Estudio económico	66
10.1	Viabilidad económica EAHE con tubos AWADUKT Thermo.....	66
10.2	Viabilidad económica EAHE con tubos "normales"	67
10.3	Viabilidad económica de los PCM	67
11	Conclusiones	69
12	Referencias	71

1 Introducción

1.1 Objeto

Diseño y simulación de un invernadero en la provincia de Almería mediante "TRNSYS17" para optimizar su demanda energética mediante las técnicas de cultivo actuales y posterior diseño y optimización de un intercambiador tierra-aire o bien de materiales de cambio de fase para mantener las condiciones ambientales deseables para la producción de tomate.

1.2 Consideraciones previas de los invernaderos

1.2.1 Características invernaderos mediterráneos

Para conocer la información de los tipos de invernaderos que podemos encontrar en la zona mediterránea nos basamos en la publicación "Nuevas tendencias en diseño y construcción de invernaderos" [1], donde se hace un análisis detallado de los condicionantes y necesidades que se tienen a la hora de fabricarlos.

Los invernaderos de zona mediterránea son generalmente de bajo coste (comparados con los invernaderos de vidrio y con equipos sofisticados que podemos encontrar en el norte de Europa), y aunque no optimizan las condiciones climáticas permiten una producción a coste competitivo.

En función de los espesores (de 0.18mm a 0.30mm) la duración de las cubiertas oscila de 2 a 3 campañas. Además los precios son muy competitivos (entre 0.5-1 €/m²).

Aunque son de muy reducida aplicación, también existen plásticos fluorescentes para incrementar la radiación fotosintética activa, films blancos para reflejar la radiación, etc.

A continuación se muestra el porcentaje de invernaderos con cubierta plástica en diversos países de la unión europea.

Países de la CEE	Cubierta plástica [%]
España	99
Italia	91
Holanda	2
Francia	70
Portugal	98
Alemania (Oeste)	10
Grecia	95
Reino Unido	15
Bélgica	5
Dinamarca	2
Suecia	14
Austria	20
Total	74

Figura 1. Porcentajes de invernaderos con cubierta de plástico en la Unión Europea [2].

A la hora de construir un invernadero la prioridad tiende a ser maximizar la radiación solar, minimizar los elementos estructurales y conseguir un buen aislamiento para reducir las pérdidas de calor.

Generalmente se aconseja construir grandes invernaderos para dotarlos de una mayor inercia térmica, facilitar el movimiento del aire interior y permitir el cultivo de especies altas.

En el caso del clima mediterráneo las condiciones climáticas más limitantes son radiación insuficiente y bajas temperaturas nocturnas en invierno, altas temperaturas diurnas en otoño y primavera y humedad extrema.

Otro recurso utilizado para tratar de minimizar algunos de estos problemas es dotarlos de una gran superficie de ventana, entorno al 30% del total.

Para evitar el enfriamiento por la noche se buscan materiales que bloqueen la radiación infrarroja y tratan de minimizarse las pérdidas por estanqueidad.

Por último, la orientación del invernadero, combinada con la pendiente de la cubierta es de gran influencia sobre la transmisión de la radiación dentro del invernadero, especialmente en los meses otoñales y de invierno, cuando la radiación es más reducida.

La orientación norte-sur (de la cumbrera) favorece una mayor uniformidad de distribución de la radiación dentro del invernadero que la orientación este-oeste, pero la norte-sur limita la transmisión en otoño-invierno, especialmente con ángulos de cubierta pronunciados.

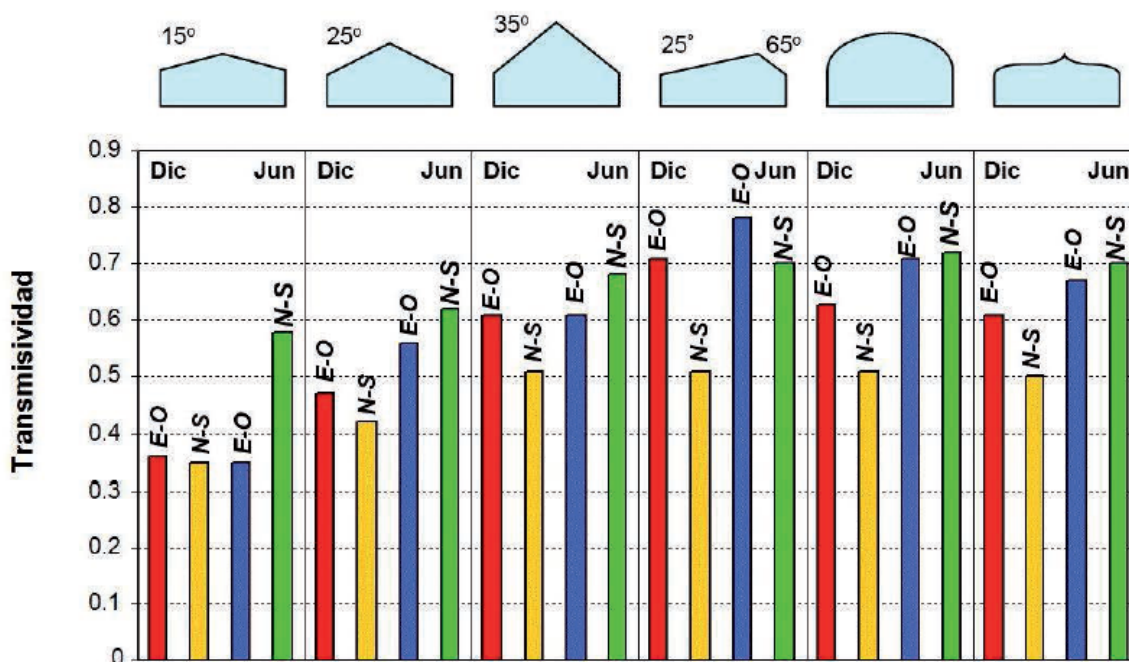


Figura 2. Transmisividad de varios tipos de invernaderos orientados este-oeste y norte-sur en Diciembre y Junio [2].

1.2.2 Invernaderos típicos almerienses

Las estructuras de invernadero más utilizadas en Almería son las descritas a continuación [2].

- Raspa y amagado: invernadero Almería formado por módulos a dos aguas adosados cuyos módulos interiores presenta simetría con respecto a la cumbrera, y en los perimetrales la pendiente del faldón exterior es diferente a la del interior.

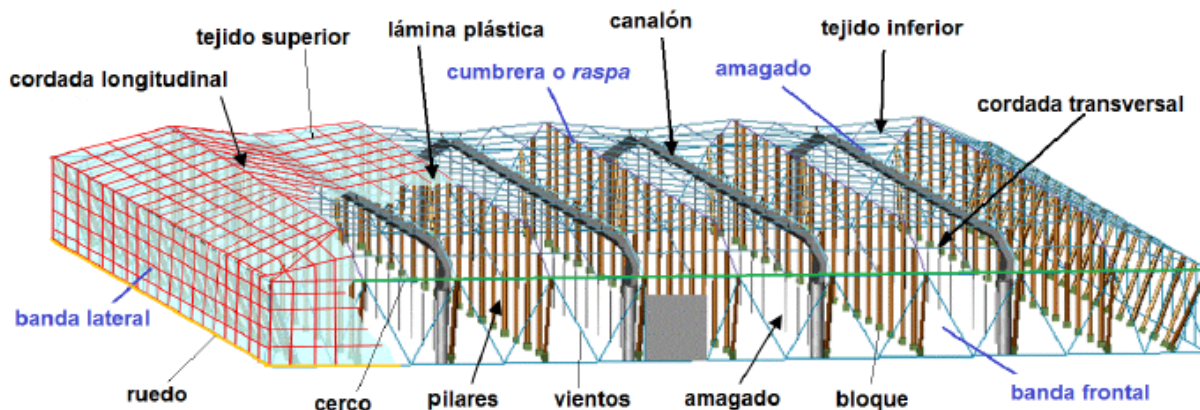


Figura 3. Invernadero tipo "Raspa y amagado" [2].

- Parral plano: invernadero Almería cuya cubierta es plana y el plástico del cerramiento de la cubierta está perforado para evacuar el agua de la lluvia.

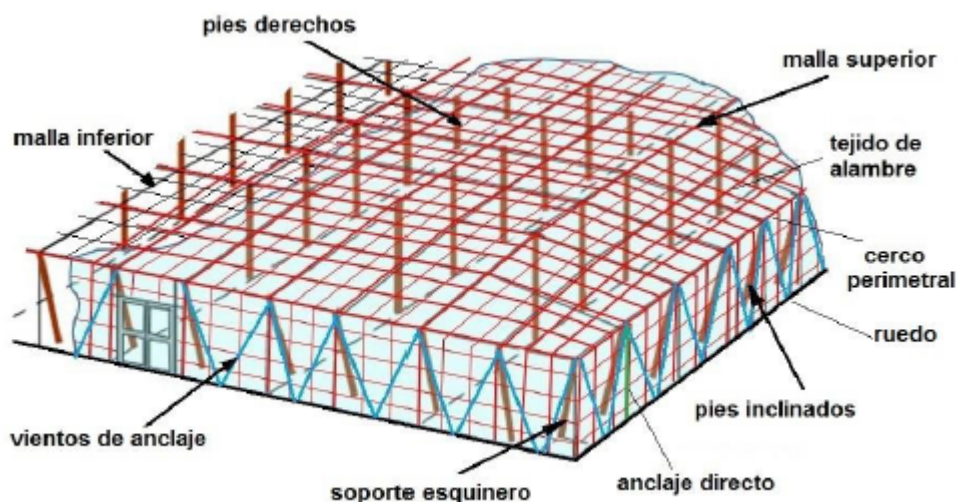


Figura 4. Invernadero tipo "Parral plano" [2].

- Asimétrico: invernadero Almería formado por módulos a dos aguas adosados cuyos módulos interiores presentan asimetría con respecto a la cumbre.



Figura 5. Invernadero tipo "Asimétrico" [2].

- Multitúnel: invernadero importado de Francia caracterizado por la forma semicilíndrica de su cubierta y por su estructura totalmente metálica.

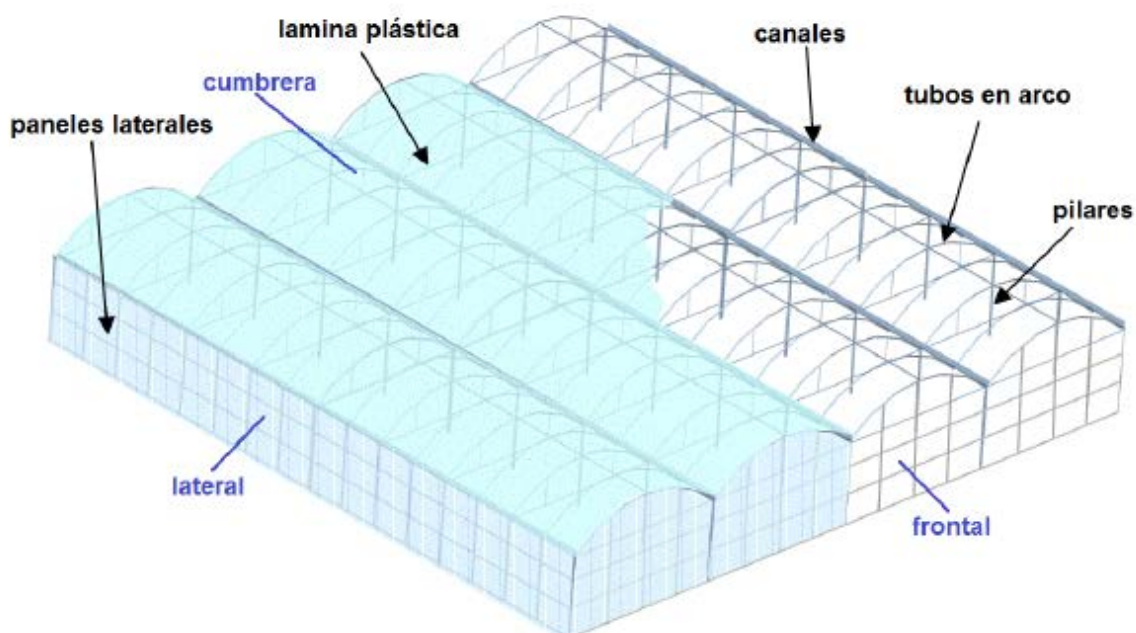


Figura 6. Invernadero tipo "Multitúnel" [2].

A continuación se muestra una tabla donde se puede ver el coste y la orientación típica en los invernaderos de la provincia de Almería. Podemos ver la situación en 1997 y en 2013, donde queda patente el aumento de la orientación Norte-Sur.

Invernadero/Comarcas	Coste (€/m ²)	Edad	N-S	E-O	Edad	N-S	E-O
		2013			1997		
Plano	4,7	19,6	75,0	20,8	9,1	34,2	28,6
Raspa y amagado	8,0	11,8	81,5	16,7	6,1	30,1	30,8
Asimétrico	6,4	13,6	21,4	78,6	4,4	25,0	31,3
Multitúnel cilíndrico	15,0	9,5	87,5	12,5	8,0	33,3	0,0
Multitúnel gótico/A dos aguas	25,0	6,7	100,0	0,0	9,4	23,5	29,4

Figura 7. Tabla de costes y orientación de los tipos de invernaderos [2].

1.2.3 Tipos de cultivos

En primer lugar nos disponemos a realizar un breve estudio sobre los cultivos desarrollados en la zona. Podemos ver que los más producidos según la tabla de la campaña 2011/2012 son tomate y pimiento, siendo por tanto los que la producción asume un mayor valor. Este tipo de producto es demandado tanto en España como en el resto de Europa y tiene unos precios competitivos por kg, que unidos a su rendimiento de producción los hacen muy interesantes.

Cultivo	Superficie (ha)	Producción (miles t)	Rendimiento (kg/m ²)	Precio medio (€/kg)	Valor Prod. (millones €)	Exportación (%)
Tomate	7.850	750	9,56	0,56	420	64
Pimiento	7.388	513	6,94	0,63	323	69
Pepino	4.500	407	9,05	0,42	171	87
Calabacín	5.100	348	6,82	0,44	153	64
Sandía	5.665	350	6,18	0,28	98	41
Melón	3.740	135	3,61	0,40	54	44
Berenjena	1.890	187	9,92	0,38	71	59
Judía	1.170	21	1,80	1,41	30	36

Figura 8. Parámetros de los principales cultivos de la campaña 2011/2012 [2].

A continuación se muestra un gráfico con el reparto de los distintos cultivos en invernadero, el cual muestra resultados similares a las distribuciones estimadas por la Junta de Andalucía y los datos estimados por los vendedores de semillas. Se observa que el cultivo principal es el tomate, que sumado al tomate cherry da un porcentaje total de 37.7%, seguido del pimiento con un 19.5% de la superficie cultivada.

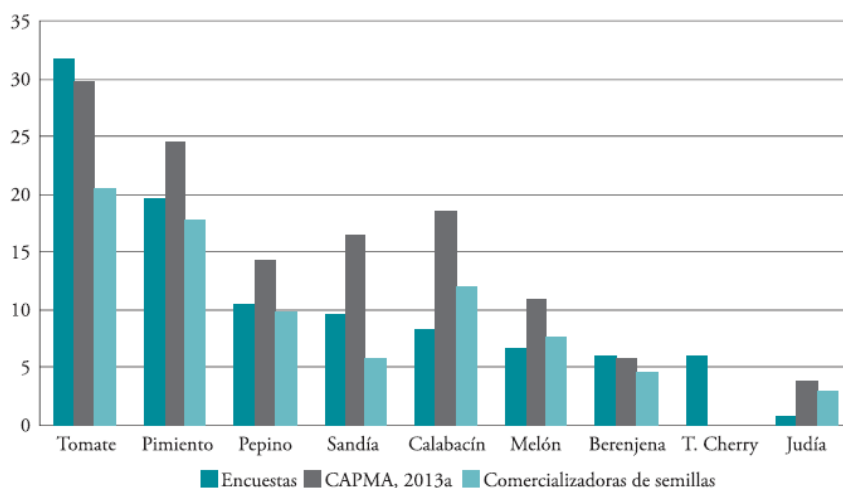


Figura 9. Cultivos realizados por los agricultores encuestados en las tres últimas campañas y estimaciones de la superficie total en la provincia de Almería por la Junta de Andalucía y por las comercializadoras de semillas (en porcentaje) [2].

Se comparan estos datos con los de las encuestas realizadas a agricultores en 3 campañas consecutivas, donde el 80.9% de los agricultores repitieron cultivos dos años seguidos. Los porcentajes obtenidos son similares con los del gráfico anterior, dando veracidad así a los datos estudiados.

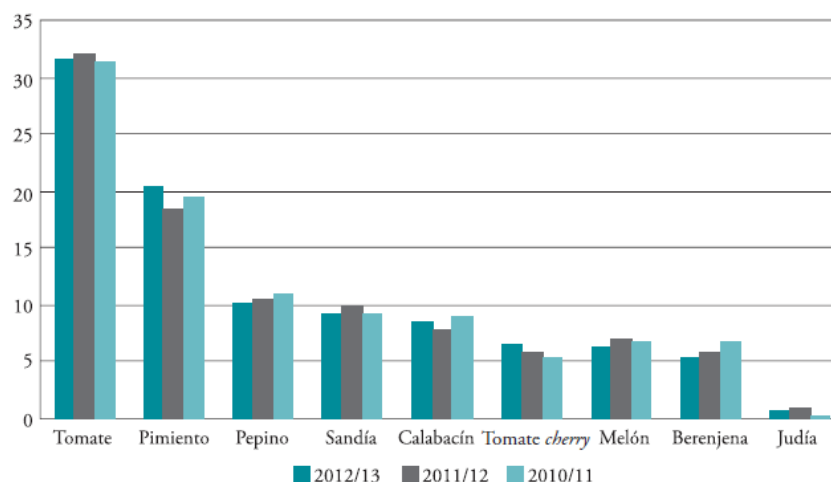


Figura 10. Cultivos realizados por los agricultores encuestados en las tres últimas campañas (en porcentaje) [2].

Por tanto podemos ver que la mayoría de los agricultores se decantan por el tomate. Este tipo de producto puede ser cultivado en tres tipos de ciclos. Ciclos cortos de otoño en los que el trasplante se realiza a finales de agosto y con recolección de noviembre a febrero; ciclos cortos de primavera, en los que se trasplanta en febrero y la recolección va de mayo a julio; y ciclos largos otoño-invierno-primavera, en los que se trasplanta a mediados de agosto y se recolecta desde diciembre hasta julio. Esta última opción es la que presenta una mayor productividad.

Tabla 1. Rendimiento medio (kg/m²) para el cultivo de tomate según el tipo de invernadero [2].

Ciclo	Tipo de Invernadero	TOMATE	
Ciclo otoño	Tipo Almería	Parral plano	8.38
		Raspa y amagado	9.20
		Asimétrico	12.00
	Multitúnel	Cilíndrico	9.00
		Gótico	
	Todos los tipos		9.00
Ciclo primavera	Tipo Almería	Parral plano	12.25
		Raspa y amagado	11.58
		Asimétrico	10.75
	Multitúnel	Cilíndrico	
		Gótico	12.50
	Todos los tipos		11.64
Ciclo largo	Tipo Almería	Parral plano	15.95
		Raspa y amagado	16.24
		Asimétrico	15.19

	Multitúnel	Cilíndrico	18.54
		Gótico	15.00
Todos los tipos			16.79

Destacar que el ciclo largo empieza a recoger prácticamente al mismo tiempo que el ciclo corto de otoño y su recolección se alarga hasta la del ciclo corto de primavera, ahorrándonos realizar un trasplante, por lo que se presenta como la opción más interesante.

1.3 Condicionantes

1.3.1 Condicionantes climáticos para producción

Para la producción de tomate deben cumplirse unas condiciones climáticas de temperatura y humedad en el ambiente determinadas. En primer lugar, respecto a las temperaturas, durante los primeros meses, cuando la planta es trasplantada no conviene bajar de los 14°C, sin embargo durante la fase de desarrollo del fruto, que es la mayor parte del ciclo, para evitar perder propiedades nutritivas se aconseja, en términos generales no bajar de los 12°C, que sin ser una temperatura óptima permite obtener una buena productividad. Por debajo de esta el desarrollo se enlentece y suelen haber problemas para la absorción de nutrientes, y por tanto deficiencias en el fruto, hasta llegar a los 8°C, temperatura en la que se para el crecimiento, necesitando además de un tiempo de espera hasta que esta se reactiva. En caso de bajar de 0°C, estaríamos en una temperatura en la que la planta moriría. Tampoco se aconseja sobrepasar los 30°C, a partir de los cuales disminuye la calidad del fruto.

En la siguiente imagen podemos ver una tabla con los valores óptimos para cada cultivo y las temperaturas mínima y máxima y mínima biológica.

Especie	Temp. mínima letal	Temp. mínima biológica	Temp. óptima		Temp. máxima biológica	Temp. de germinación	
			Noche	Día		Mínima	Óptima
Tomate	(-2) a 0	8-10	13-16	22-26	26-30	9-10	20-30
Pepino	0	10-13	18-20	24-28	28-32	14-16	20-30
Melón	0	12-14	18-21	24-30	30-34	14-16	20-30
Judía	0	10-14	16-18	21-28	28-35	12-14	20-30
Pimiento	(-2) a 0	10-12	16-18	22-28	28-32	12-15	20-30
Berenjena	(-2) a 0	9-10	15-18	22-26	30-32	12-15	20-30
Lilium	0	10-12	12-16	20-25	25-30	12	14

Figura 11. Valores de temperatura adecuados para varios cultivos hortícolas en invernadero [12].

Respecto a las humedades relativas no es aconsejable superar el 80%, valor a partir del cual aumenta el riesgo de aparición de enfermedades criptogámicas tales como Botrytis, etc. En la siguiente imagen se muestra una tabla con los valores óptimos aconsejados de humedad relativa para diversos cultivos. En el caso del tomate el valor ideal rondaría el 55-60%.

Especie	Temperatura óptima del sustrato	CO ₂ (ppm)	Humedad relativa (%)
Tomate	15-20	1000-2000	55-60
Pepino	20-21	1000-3000	70-90
Melón	20-22	–	60-80
Judía	15-20	–	–
Pimiento	15-20	–	65-70
Berenjena	15-20	–	65-70
Lilium	15-20	–	65-70

Figura 12. Valores de humedad adecuados a cada cultivo hortícola en invernadero [13].

1.3.2 Condicionantes del entorno físico

Las condiciones climáticas de la provincia de Almería nos provocan inviernos suaves y veranos extremadamente calurosos. En nuestro caso al tener unas temperaturas marcadas para la producción del cultivo de entre 8 y 30°C, deberemos aumentar mediante los sistemas de climatización propuestos la temperatura en invierno e intentar refrigerar en la medida de lo posible en verano, donde la temperatura ambiente llega a superar los 40°C.

Destacar también que la localización limita las características térmicas de nuestro terreno, especialmente la conductividad térmica del terreno. Al estar en una zona semi-desértica, los terrenos tienen una baja humedad. La tierra seca posee una conductividad mucho más baja que los terrenos húmedos, especialmente, que las arcillas. Este parámetro reducirá la conductividad térmica, limitando el posible intercambio de calor entre el EAHE y el suelo.

1.4 Situación actual

1.4.1 Descripción del problema a resolver

Implementación de un sistema de climatización de bajo consumo energético y sostenible que permita mantener las temperaturas del invernadero entre 8 y 30°C durante todo el año, de forma que no se frene el crecimiento de los cultivos. Además se intentará mantener una humedad relativa que no supere el 80%, valor a partir del cual aumentan las probabilidades de que el cultivo enferme.

Generalmente, debido a las altas temperaturas que se alcanzan en el interior del invernadero, se para el cultivo durante los meses de Junio, Julio y principios de Agosto, aprovechando así para labores de limpieza y mantenimiento y se trasplanta en Agosto. Con la implementación del nuevo sistema de climatización se buscará también prolongar los días productivos.

1.4.2 Descripción de sistemas actuales utilizados

Actualmente la gran mayoría de los invernaderos no disponen de ningún sistema de climatización ni de sistemas de monitorización de temperatura para llevar a cabo un control de éstas que interactúe con métodos de climatización pasivos.

Como podemos ver en la siguiente figura solo un 13% de los invernaderos disponen de algún sistema de control climático.

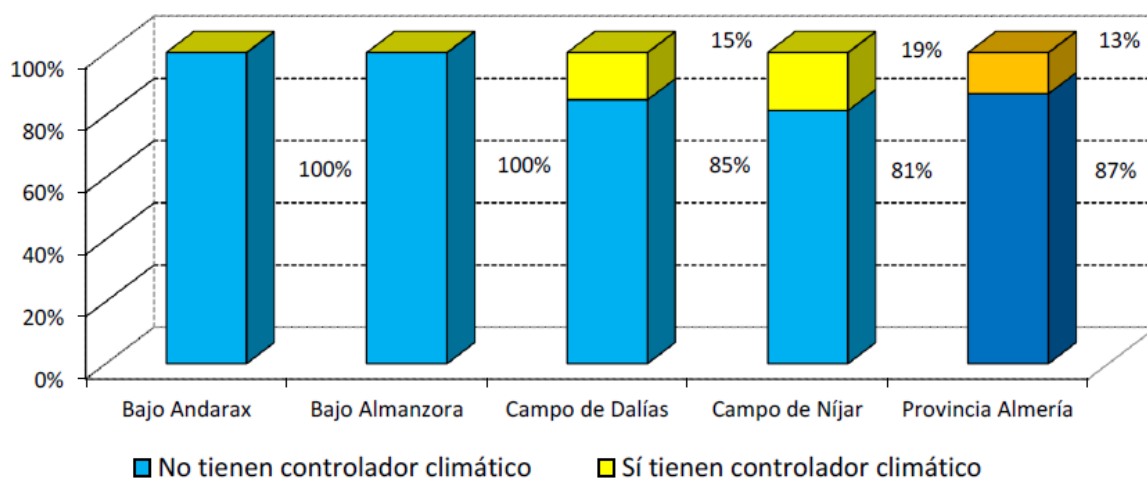


Figura 13. Invernaderos equipados con control climático. Datos en porcentaje [2].

Generalmente en verano la única fuente de refrigeración que se utiliza es la ventilación natural, donde se varía el grado de obertura de las ventanas del invernadero para intentar maximizar las corrientes de aire y así minimizar las altas temperaturas que se dan en el interior del invernadero. También se realiza un blanqueado de la cubierta mediante una pintura a base de carbonato de calcio de las cubiertas para disminuir el efecto la radiación solar, estimándose la reducción en un 50%. Estos sistemas ya se tienen en cuenta en el modelo a diseñar, donde ponderaremos la ventilación de aire del exterior y variaremos el material del techo para intentar adecuarnos al máximo a la realidad.

En algunos invernaderos se han implementado sistemas de refrigeración a base de nebulización de agua. Dentro de la nebulización de agua las alternativas existentes es con alta, media o baja presión. A continuación en el siguiente gráfico se muestran los porcentajes de invernaderos con cada uno de los métodos de refrigeración.

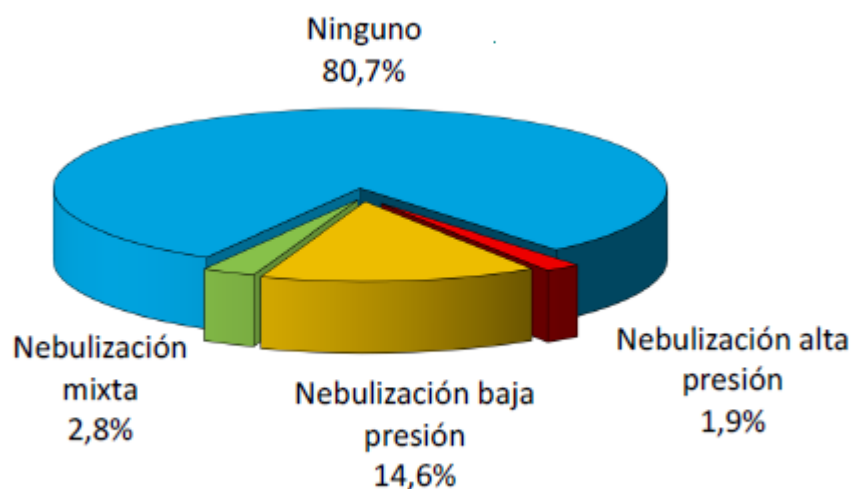


Figura 14. Sistemas de refrigeración por evaporación de agua. Datos en porcentaje [2].

La gran mayoría de invernaderos (91.6%) no dispone de ningún método para mantener las temperaturas en invierno. A continuación se muestra un gráfico con los sistemas de climatización utilizados en invierno.

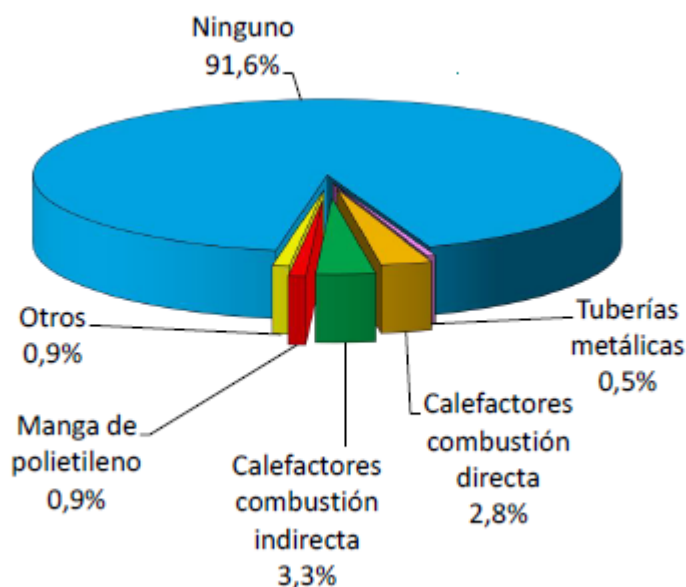


Figura 15. Sistemas de calefacción. Datos en porcentaje [2].

1.4.3 Estudios invernaderos Almería

Como punto de partida tomamos algunos trabajos en los que se estudian invernaderos de la zona de Almería, los cuales tienen una forma característica y de echo se les conoce como invernaderos tipo Almería, y de entro de estos el más utilizado es el llamado "parral".

Tomamos como referencia el invernadero que de tipo parral de la estación experimental de Cajamar "Las Palmerillas" ubicado en El Ejido (Almería) ($36^{\circ} 47' 40''$ N; $2^{\circ} 43' 10''$ W y a una altitud de 155m) [11]. Este invernadero, con orientación Norte-Sur tiene unas medidas de 38 metros de largo por 23.2 metros de ancho, con una altura máxima de 4.3 metros y una inclinación del techo de 12° . Además está construido con 5 vanos de una longitud de 7.6 metros de ancho.

El invernadero tendrá oberturas del tipo "enrollables" con unas oberturas en el techo de 14.2m por 1.3m, dando un área abierta total de 92.3m^2 . En las paredes las oberturas serán de 32.75m por 1.5m dando un área abierta máxima de 92.25m^2 .

En las siguientes figuras podemos ver los tipos de geometrías características para los invernaderos y que serán de aplicación en nuestro caso.

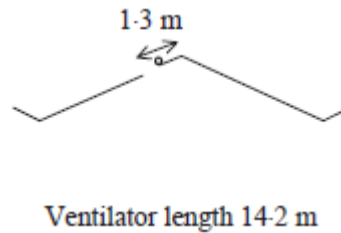


Figura 16. Geometría del techo con sistema de ventilación enrollable [11].

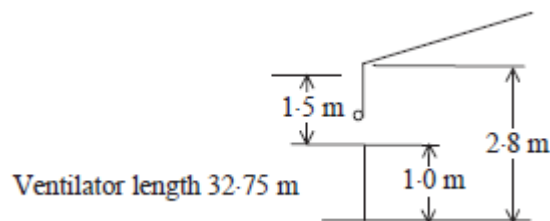


Figura 17. Geometría de la pared con sistema de ventilación enrollable [11].

1.4.4 Modelo de los flujos energía interactuantes

A la hora de realizar nuestro estudio, deberemos en primer lugar generar un modelo del invernadero en Trnsys para determinar las cargas térmicas que determinarán las condiciones ambientales en el interior del invernadero.

Las principales son la Radiación solar que atraviesa la cubierta de plástico, conducción a través de los cerramientos y la infiltración a través de las ventanas, que variara en función del grado de obertura. A estas debemos añadir dos más, que es la conducción de calor a través del suelo y la transpiración de las plantas, también denominada evapotranspiración. Esta carga generada por las plantas provoca un aumento de la humedad relativa interior proporcional a la radiación y una carga latente debida a la evaporación del agua, que se traduce en un constante efecto de fresco del interior del invernadero.

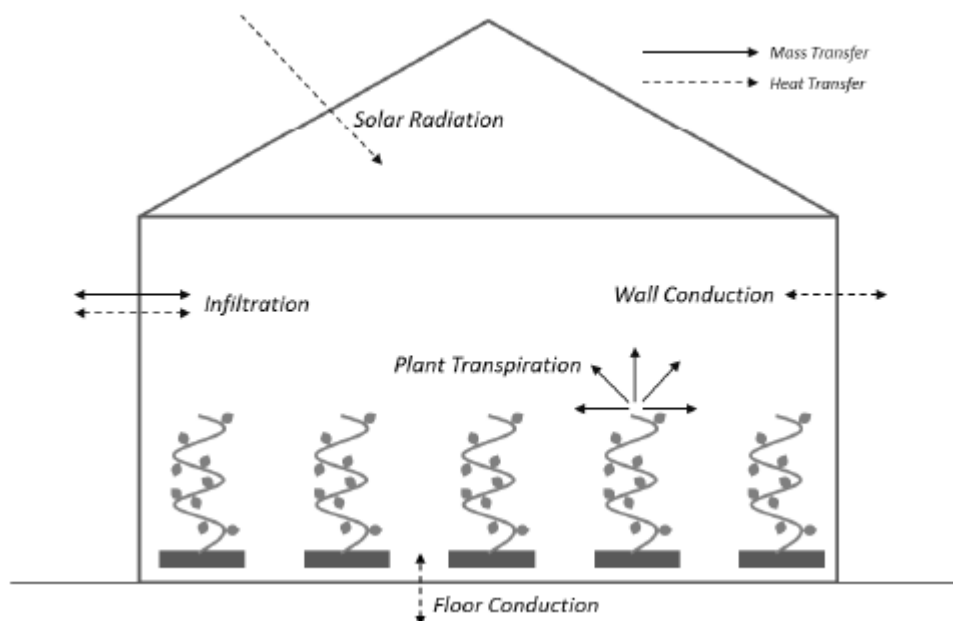


Figura 18. Representación esquemática de los flujos de energía y humedad en un invernadero [3].

1.5 Sistemas de climatización considerados

1.5.1 Intercambiadores tierra-aire (EAHE)

1.5.1.1 Resumen descriptivo del intercambiador tierra-aire (EAHE)

Los intercambiadores tierra-aire son una instalación de climatización que ha empezado a implementarse en edificaciones de bajo consumo. Para conseguir un ahorro energético se aprovecha el efecto de refrescamiento del suelo en verano y de precalentamiento del aire en invierno. Para aumentar su efecto se conecta el equipo a un sistema de ventilación mediante los cuales se marcan los caudales de aire.

Estos equipos constan básicamente de un sistema de bombeo de aire y una tubería subterránea mediante la cual se realiza la transferencia de energía con el subsuelo. Podemos distinguir dos tipos básicos de equipos, de lazo abierto, que introduce aire del exterior y de lazo cerrado, que recircula el aire del interior. A continuación se muestran dos figuras donde podemos ver los dos tipos de disposiciones.

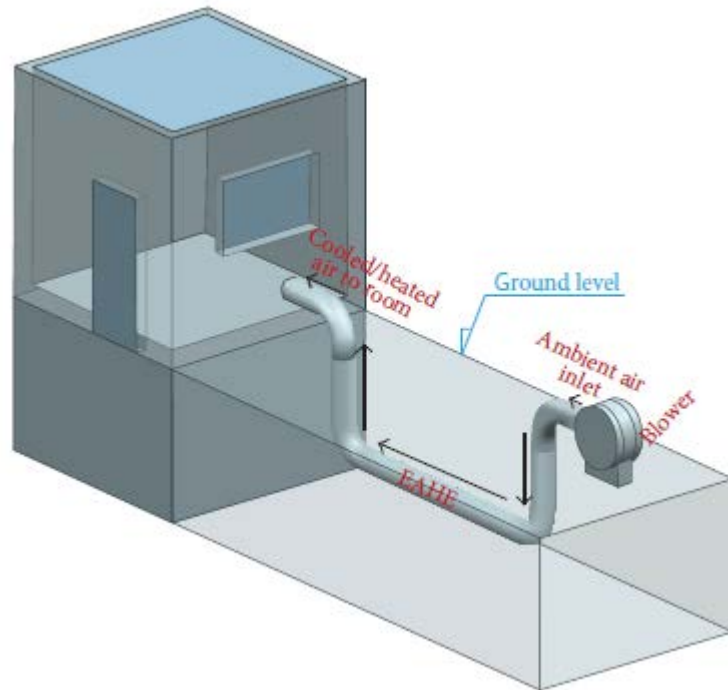


Figura 19. Intercambiador tierra-aire de lazo abierto [4].

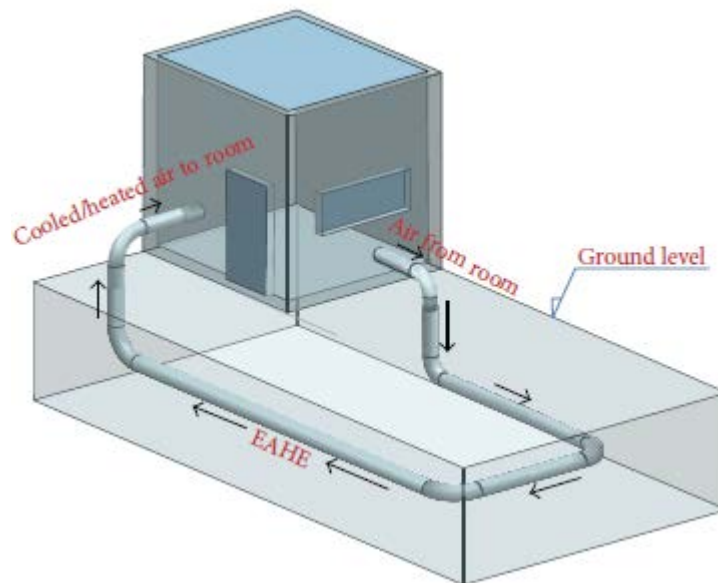


Figura 20. Intercambiador tierra-aire de lazo cerrado [4].

En nuestro caso el objetivo ideal del equipo es conseguir un margen de temperaturas de 12 a 30 grados centígrados, temperaturas óptimas para el crecimiento de las hortalizas que se cultivan en el invernadero, aunque las mayores velocidades de crecimiento se dan a partir de 15 grados. Pese a ello, el objetivo real que nos marcamos es no bajar de 8°C, temperatura en la que se frena el crecimiento y que creemos que podremos alcanzar. Por tanto buscamos aportar el calor del suelo en invierno para evitar bajar de 8 grados, y si las circunstancias lo permiten, acercarnos el máximo a los 12 para aumentar la productividad del cultivo. En verano, para conseguir no sobrepasar los 30 grados, sumaremos el efecto del equipo EAHE a las

técnicas actuales ya utilizadas como es un aumento de la ventilación y un pintado del techo para reducir los valores de radiación recibida.

El dimensionado del intercambiador tierra-aire está determinado, sobre todo, por los parámetros siguientes:

- Caudal volumétrico de aire
- Profundidad de montaje
- Material del tubo
- Número de capas de tubos
- Longitud de los tubos
- Valores característicos del subsuelo
- Clima en el emplazamiento de la instalación

El equipo será caracterizado mediante "TRNSYS17" y se analizarán diversas configuraciones hasta encontrar una que satisfaga nuestras necesidades o que llegue a un compromiso entre ahorro energético y coste de la instalación. Para comprobar su eficacia se simulará mediante el software "TRNSYS17" un año típico de la localización donde se encuentra el invernadero a estudiar, Almería. De esta manera se podrá predecir la temperatura de salida del aire y la potencia calorífica intercambiada en cada instante por el intercambiador. Esta información alimentará al modelo del invernadero para analizar su efecto en la temperatura interna del invernadero.

1.5.1.2 Estudios previos EAHE

Para realizar este proyecto se parte de estudios anteriores que muestran la efectividad de la climatización geotérmica como fuente de ahorro de energético, permitiéndonos reducir el consumo entre un 30 y un 50% (los valores varían en función del clima) para edificios de tipo oficina o vivienda. En verano se habla de reducciones de temperatura en torno a 2-3°C [7] [8], incluso se llega a hablar de rangos de 8-12°C [9], mientras que en invierno encontramos referencias con incrementos de temperatura de hasta 5°C [10].

En nuestro caso se decide estudiar la viabilidad de los equipos EAHE en invernaderos, donde se cree que el ahorro energético puede ser mayor, dado que el rango de temperaturas a mantener para evitar frenar el crecimiento de las plantas es mayor (8-30°C) al que se da para edificios tipo vivienda/oficina (22-27°C).

1.5.2 Materiales de cambio de fase (PCMs)

1.5.2.1 Resumen descriptivo materiales cambio de fase

En los materiales de cambio de fase (PCMs) se aprovecha la capacidad de almacenar o ceder calor de los materiales ligada al cambio de fase sólido/líquido. Para ello interesa que le material tenga un alto calor de fusión y un punto de transición de fase en el entorno de la temperatura de operación establecida.

Los PCMs pueden ser clasificado por su composición o en base al tamaño de las cápsulas que los forman.

Tabla 2. Clasificación de los PCM según su composición [5].

Tipo de PCM	Composición
Orgánicos	Compuestos de parafina
	Compuestos sin parafina
Inorgánicos	Sales hidratadas
	Metálicos
Eutécticos	Orgánico-Orgánico
	Orgánico-Inorgánico
	Inorgánico-Orgánico

Tabla 3. Clasificación de los PCM según el tamaño de las capsulas que los conforman. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de PCM	Tamaño cápsulas
Micro PCMs	>1mm
Macro PCMs	<1mm

1.5.2.2 Características de los tipos de PCMs

1.5.2.2.1 *MicroPCMs*

Cápsulas que van desde menos de una micra a varios cientos de micra. Estas pueden ser de distintas formas y tienen un núcleo con pequeñas gotas de material de cambio de fase. Se pueden encapsular los tres estados de la materia (sólido, líquido y gas).

La sustancia PCM es normalmente una parafina o un éster de ácido graso que absorbe y desprende calor en los procesos de cambio de fase. Independientemente del estado del PCM (líquido o sólido), la cápsula permanece en estado sólido ya que el recubrimiento es un polímero inerte y muy estable.

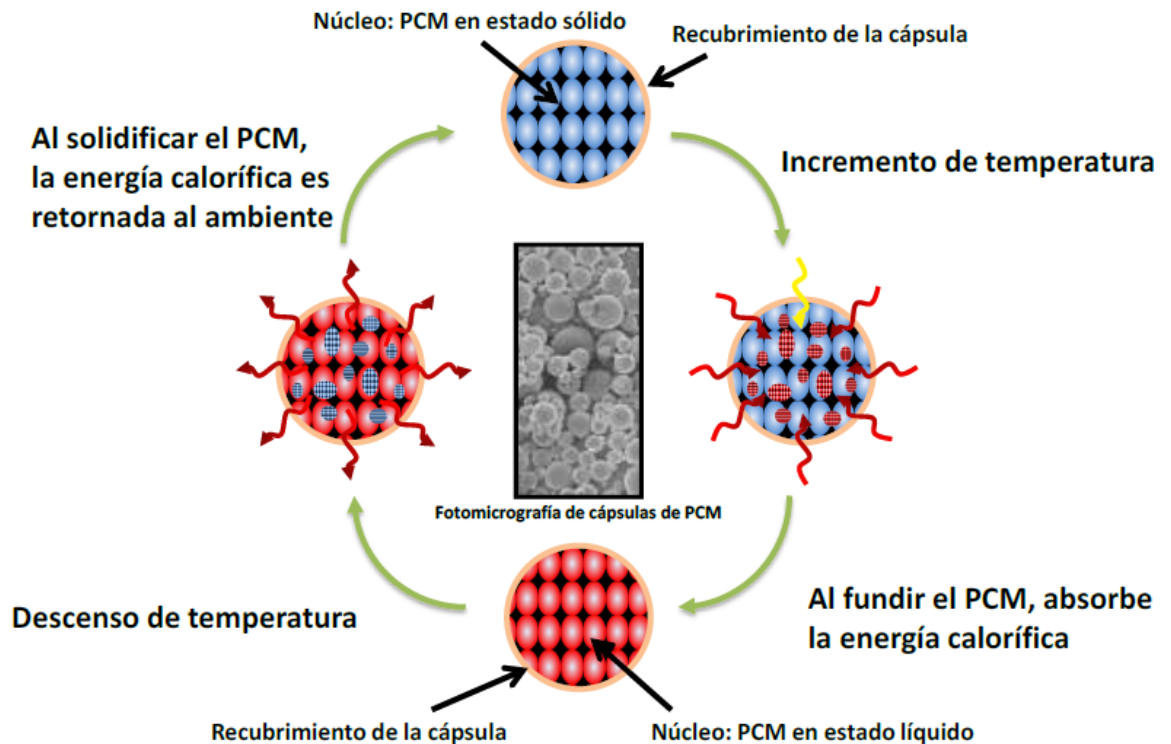


Figura 21. Esquema de funcionamiento de los materiales con cambio de fase (PCM) micro encapsulados. Fuente: "Estudio de materiales con cambio de fase (PCM) y análisis SEM de micro (PCM)[5].

Sus características típicas son:

- Cualquier color.
- Amplio rango de temperaturas disponible.
- Forma: Polvo seco o pasta de filtración húmeda.
- Tamaño media de partícula: micras.
- Estabilidad a elevadas temperaturas.

1.5.2.2.2 MacroPCMs

Son cápsulas de un tamaño mayor (normalmente en torno a 3-5mm) que contienen elevadas concentraciones de materiales con cambio de fase. Generalmente diseñados para absorber calor.

Sus características son:

- Cualquier color.
- Amplio rango de temperaturas disponibles.
- Forma: esférica, bolas sólidas.
- Tamaño medio de partícula: mm.

1.5.2.3 Placas de PCMs

En nuestro caso vamos a trabajar con unos módulos compactos de placas de aluminio a base de PCMs macroencapsulados de la casa RubiTherm [41].

Las placas de aluminio aseguran un alto nivel de transferencia de calor y es un material que resiste bien la corrosión, lo que permite que se implante con facilidad en el suelo del invernadero.

Las placas tienen un tamaño de 450·300mm y diferentes espesores (5-15mm), variando el PCM interior y la capacidad de almacenamiento para cada rango de temperaturas.

Destacar que la temperatura de cambio de fase comprende un pequeño rango de 2-3 °C, dado que el PCM no está formado por una sustancia pura.

Finalmente, comentar que no todos los rangos de temperatura tienen la misma capacidad de almacenamiento de calor. Esto es debido a que para rango hay un tipo de PCM con un calor de fusión específico. Por ello, pese a querer evitar bajar de 8°C, se estudiara la opción de utilizar un PCM con una temperatura de cambio de fase más elevada, pero con mayor calor de fusión, intentando optimizar la selección de las placas.

2 Objetivos

A continuación se muestran los objetivos a partir de los cuales se genera el proyecto, marcando la dirección a seguir en la realización de estos y los puntos de estudio a tratar.

- Generación de un modelo de invernadero en Trnsys con la definición de la geometría, materiales y las condiciones de un cultivo de tomate para la determinación de las cargas térmicas y condiciones ambientales a lo largo del periodo de cultivo.
- Análisis y optimización de las técnicas de cultivo actuales para reducir la demanda de calor y frío sin añadir nuevos equipo.
- Implementación de un intercambiador de calor tierra aire (EAHE) que cubra las demandas de calor en invierno y estudiar la viabilidad de este en verano para refrigerar el invernadero, de forma que consigamos más horas en la zona de confort del cultivo.
- Optimización del intercambiador de calor tierra aire a instalar considerando diversas disposiciones y caudales de aire.
- Implementación de placas de PCM para aportar calor en invierno y evitar que la temperatura en el interior del invernadero descienda por debajo de las temperaturas mínimas de crecimiento del cultivo.
- Presupuesto de los equipos a implementar y análisis de la viabilidad económica comparándolo con métodos de climatización tradicionales.

3 Creación modelo invernadero

3.1 Diseño geometría invernadero mediante "Sketch Up"

En primer lugar, dibujamos mediante "Sketch Up" un primer modelo del invernadero siguiendo la geometría utilizada en el artículo "Natural Ventilation of Parral Greenhouses" [11].

En nuestro caso realizaremos una simplificación, suponiendo la superficie total de todas las paredes como ventanas, única forma de dejar pasar la luz solar que nos ofrece el programa. A continuación daremos el nivel de ventilación que tienen estas ventanas creadas, donde buscaremos un equivalente al valor real de las originales del invernadero.

Le damos orientación Norte-Sur, que en las siguientes imágenes podemos ver representada como el eje verde. Esta orientación es la típica de los invernaderos, para maximizar la cantidad de luz solar a recibir.

Las cotas proporcionadas para dibujar el invernadero son 38 metros de largo por 23.2 metros de ancho, con una altura máxima de 4.3 metros y una inclinación del techo de 12° realizando vanos de 7.6 metros. En las siguientes figuras podemos ver su geometría característica.

Mediante un plug-in que nos permitirá pasar el dibujo realizado al volumen de control a estudiar en TRNSYS17 dibujamos el invernadero dentro del rectángulo de puntitos. En primer lugar se dibuja como un sólido, donde todas las paredes serían opacas.

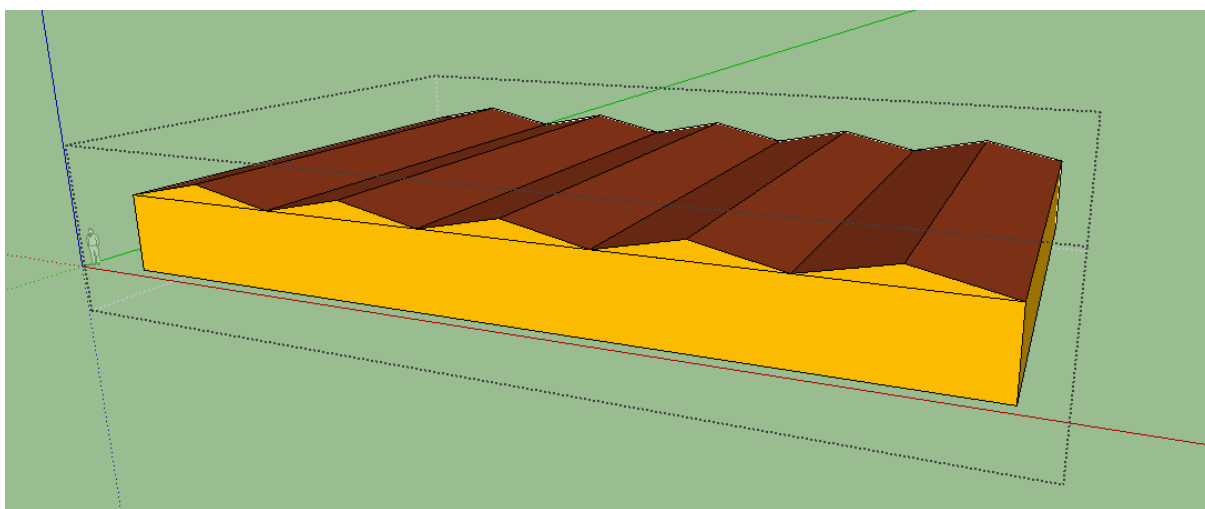


Figura 22. Modelo sólido invernadero en Sketch Up

A continuación dibujaríamos unas ventanas que ocupasen prácticamente toda la superficie de paredes y techo, mediante las cuales TRNSYS17 entiende que pasará la luz solar.

Destacar que Sketch Up no permite transformar toda la pared en ventanas, sino que nos vemos obligados a dejar un espacio mínimo respecto a las aristas. En este caso hemos dejado 10cm respecto a cada extremo, pero consideramos la aproximación correcta dado que más de un 98% de la pared pasa a ser ventana.

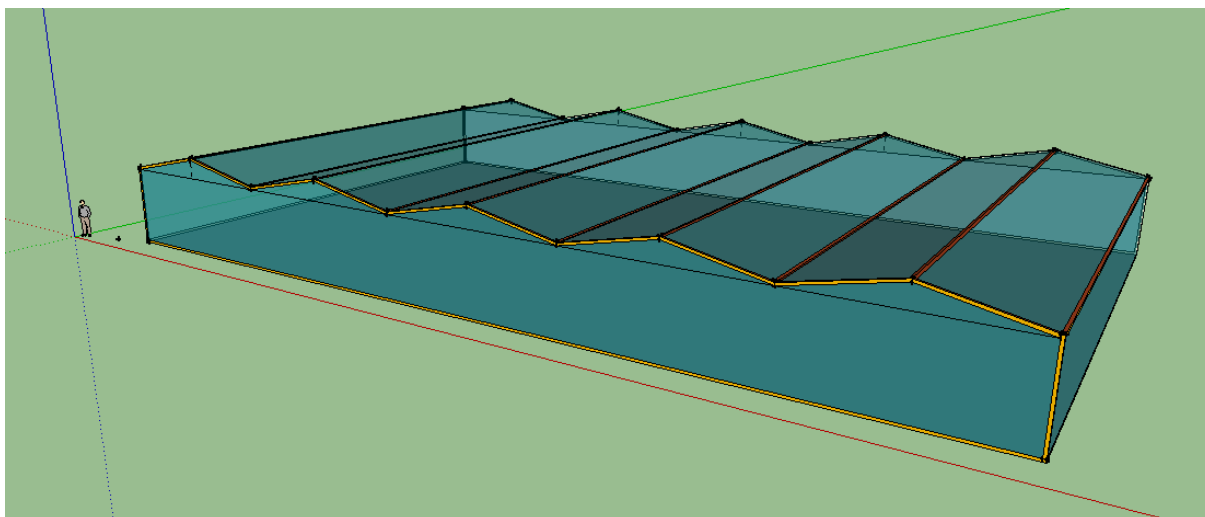


Figura 23. Modelo invernadero en Sketch Up con ventanas

Una vez dibujado el invernadero lo cargaríamos en TRNSYS17 donde empezariamos a definir sus propiedades. Básicamente tendremos que darle materiales y sus características, niveles de ventilación natural y forzada (si se considerase) y cargas de calor y frio, donde deberemos tener en cuenta el efecto de personas y plantas que puedan haber en su interior.

3.1.1 Importación a TRNSYS 17

Al pasar el archivo generado a TRNSYS17 generamos un fichero del tipo "3D Building Project (Multizone)", donde el invernadero generado anteriormente se cargará dentro de un Type predeterminado de TRNSYS, en este caso el Type 56, en el cual se pueden introducir todos los parámetros propios de un edificio.

3.2 Etapas del cultivo

En este punto se realiza una breve descripción de las diferentes rutinas llevadas a cabo sobre el invernadero por los agricultores para tenerlas en cuenta a la hora de realizar las condiciones de contorno de los diversos parámetros que introducimos en Trnsys. También se describirá el proceso típico de crecimiento del tomate y cómo afecta este a la evapotranspiración. Estos puntos son analizados detalladamente en el apartado 1 del Anexo 1, en esta apartado solo son presentados para tener en cuenta la interrelación que hay entre estos hechos.

En primer lugar recordar que se plantará tomate en ciclo largo. Por tanto se realiza el trasplante a mediados/finales de Agosto (23 de Agosto). Se considera que el efecto de la evapotranspiración dependerá de un factor de cultivo K_c del que se especificará la función más adelante, se adelanta que este aumenta hasta el 1 de Enero al desarrollarse la planta y aumentar su área foliar. A partir de aquí se considerará una disminución del K_c debido a que la planta se estanca y se recolecta.

El segundo punto a destacar será que en el mes de Julio y la primera quincena de Agosto se tendrá el invernadero parado (sin producción) para labores de mantenimiento. En función de los resultados se decidirá si merece la producción en Junio. Se escogen estos meses dado que las temperaturas en el interior del invernadero son excesivamente elevadas para las plantas, y además el producto no es competitivo debido a que en esta época se comercializan los productos de cultivo abierto extensivo, de coste mucho más reducido.

Una práctica que se realiza habitualmente y que deberemos tener en cuenta a la hora de caracterizar el invernadero son los blanqueamientos que se realizan de la cubierta mediante pintura a base de carbonato de calcio para reducir el efecto de la radiación solar en las épocas más calurosas. Estos blanqueamientos pueden realizarse en diversas capas o de una sola vez, dependiendo de la dedicación del productor. En nuestro caso consideraremos que se aplicará en primer lugar, a principios de Marzo, una capa que reduzca la radiación solar interior un 50%. Finalizado el verano, hasta finales de septiembre se deja esta capa y a partir de aquí se retira todo el blanqueamiento para los meses más fríos.

En función del crecimiento de la planta y de la temperatura exterior también varían los horarios de apertura de las ventanas. En muchos casos, pese a querer retener el calor se deberán realizar venteos para reducir la humedad relativa interior y evitar brotes de enfermedades para los cultivos. Se utilizarán los horarios típicos de los productores de la zona.

3.3 Materiales

3.3.1 Tipos de cubiertas

A la hora de seleccionar los materiales de la cubierta de un invernadero hay que tener en cuenta la transmisión de radiación solar, la transparencia a la radiación infrarroja o térmica y la transmisión de calor de los materiales que la componen.

Generalmente se realizan de los siguientes materiales:

- Films plásticos: de polietileno, copolímero etilen vinilacetato y cloruro de polivinilo y plásticos multicapa. Dentro del polietileno es donde encontramos una mayor variedad en función de las necesidades vida útil, aislamiento o transmisividad.
- Plásticos rígidos: de polimetacrilato de metilo, policarbonato y poliéster.
- Vidrio: cristal de vidrio impreso

En nuestro caso seguiremos el modelo del artículo "Natural Ventilation of Perral Greenhouses" [1], utilizando polietileno de baja densidad, que es el material más utilizado en la zona de Almería. Al ser una opción muy extendida podemos encontrar todas sus características para posteriormente poder introducirlo en Trnsys.

3.3.2 Creación de materiales en la biblioteca

Dado que en la biblioteca de materiales de TRNSYS no está el polietileno de baja densidad (PEBD), se utilizara el software window 7.4, creado por el "Lawrence Berkeley Laboratory" mediante el cual se generarán las ventanas y se importaran a TRNSYS. En este caso lo que se proporciona al programa son las características térmicas y ópticas necesarias para que el programa calcule los valores de U y G. Estos valores pueden variar en función de la biblioteca que consultemos dado que dependen también de otros factores como tamaño de la ventana o velocidad del viento. Finalmente el programa nos calcula unos coeficientes, U y G, cuyo significado es:

- **U value:** coeficiente que describe las pérdidas de la ventana. Representa la transferencia térmica a través del vidrio (PEBD en nuestro caso) por conducción, convección y radiación.
- **G value:** coeficiente de ganancia de calor solar o SHGC. Consiste en la relación entre la energía total que entra en el interior del inmueble (suma de la que entra por transmisión directa, y la que se radia tras el calentamiento del vidrio por absorción) a través del vidrio, y la energía solar incidente en el mismo.

Las características del polietileno del PEBD las obtenemos del documento “Protocolo de auditoria energética en invernaderos” [13], donde encontramos las siguientes tablas:

Tabla 7. Absorbividad (α), emisividad (ϵ), transmisividad (τ) y reflectividad (δ) para diferentes tipos de radiación; coeficiente de pérdidas de calor (U) y densidad (ρ_c) de los materiales comúnmente utilizados como cubierta de invernaderos

Materiales utilizados en cubiertas simples, en dobles paredes o como pantallas térmicas	Espesor (mm)	Radiación solar (300-2.500 nm)			Radiación visible (380-760 nm)			Radiación térmica (2.500-40.000 nm)			U (W/m ² ·°C)	ρ_c (g/cm ³)
		($\alpha = \epsilon$)	(τ)	(δ)	($\alpha = \epsilon$)	(τ)	(δ)	($\alpha = \epsilon$)	(τ)	(δ)		
Vidrio hortícola (VH)	4	0,03	0,89	0,08	0,01	0,91	0,08	0,90	0,00	0,10	6,7	2,40
Poliéster (PRV)	1	0,01-0,02	0,89-0,92	0,07-0,09	0,01	0,93	0,06	0,64-0,69	0,27-0,32	0,04		1,50
PVC rígido	18	0,11	0,62	0,27	0,02	0,61	0,37	0,92	0,01	0,07	3,8	1,30
Polimetacrilato de metilo (PMMA)	8	0,06	0,82	0,12	0,01	0,92	0,07	0,98	0,00	0,02	3,4	1,19
Policarbonato (PC)	4	0,08-0,11	0,78	0,14-0,15	0,06-0,10	0,75-0,79	0,15	0,89-0,98	0,02-0,03	0,09	3,5	0,17-0,20
Polietileno sin aditivos (PE)	0,1	0,01	0,88-0,91	0,08-0,11	0,01	0,88-0,91	0,08-0,11	0,04-0,19	0,79-0,84	0,02	9,1	0,92
Polietileno de baja densidad (PEbd)	0,18	0,03	0,88	0,09	0,01	0,89	0,10	0,13-0,40	0,53-0,80	0,07	9,4-16,2	0,91
Polietileno de larga duración (PEld)	0,1	0,03	0,88	0,09	0,01	0,89	0,10	0,20-0,40	0,53-0,76	0,04-0,07	9,4-16,2	0,92
Polietileno infrarrojo (PEir)	0,1	0,03	0,89	0,08	0,01	0,89	0,10	0,77	0,20	0,03	8,6-13,0	0,92
Polietileno térmico (PEt)	0,18	0,03	0,89	0,08	0,02	0,90	0,08	0,80	0,10	0,03	8,6-13,0	0,92
Copolímeros EVA	0,1	0,02	0,89-0,91	0,07-0,09	0,00	0,90-0,92	0,08-0,10	0,42-0,58	0,39-0,55	0,03	7,8	0,94

Fuentes: Feuilleley et al., 1989 Nisen y Coutisse, 1981
 Feuilleley et al., 1994 a. Nisen et al., 1984
 Feuilleley y Issanchou, 1996 Nijskens et al., 1989 Nijskens et al., 1984 a. Nijskens et al., 1984 b.

Figura 24. Fragmento tabla de propiedades térmicas y ópticas de los materiales comúnmente utilizados como cubierta de invernaderos [13].

Existen cubiertas de PEBD de diversos espesores, el cual varía en función de su vida útil. Las cubiertas de 0.18mm se dimensionan para 2-3 años, las de 0.20mm para 3 años y las de 0.30mm para 4 años [30]. Actualmente la solución más utilizada son las cubiertas de 0.20mm, aunque las de 0.18mm también son muy habituales. En cambio las de 0.30mm son casos excepcionales.

Material	λ_c (W/m·K)
Polietileno de baja densidad (PEbd) ^a	0,45
Copolímero etileno y acetato de vinilo (EVA) ^a	0,45
Polietileno alta densidad (PE) ^b	0,33
Polipropileno (PP) ^b	0,17-0,22
Vidrio celular ^b	0,054-0,067
Polycarbonato ondulado (PC) ^c	0,19
Polimetacrilato (PMMA) ^c	0,19
Policloruro de vinilo (PVC) ^d	0,16
Vidrio ^e	0,76

Figura 25. Tabla de conductividad térmica de los materiales comúnmente utilizados como cubierta de invernaderos, λ_c [12].

A partir de las tablas encontradas podemos generar una propia donde se mostrarán tan solo las propiedades que nos pide el programa window 7.4. Destacar que durante algunos periodos del año, la transmisividad se verá reducida debido al blanqueamiento que se realiza sobre la cubierta con carbonato de calcio. Para ello generamos dos tipos de PEBD que deberemos variar en función de la época del año dentro del Type56.

Tabla 4. Valores a introducir de los materiales para crearlos en window 7.4.

Propiedades	PEBD	PEBD Blanqueado
Conductividad Térmica, λ_c , (W/m·K)	0.45	0.45
Espesor (mm)	0.18-0.20-0.30	0.18-0.20-0.30
Densidad, ρ , (kg/m ³)	0.91	0.91
Emisividad, ϵ	0.13	0.13
Transmisividad Solar, τ_{solar}	0.88	0.44
Reflectividad Solar, δ_{solar}	0.09	0.53
Transmisividad Visible $\tau_{visible}$	0.89	0.89
Reflectividad Visible, $\delta_{visible}$	0.1	0.1

A continuación se muestra otra tabla con los valores que deberá tener la transmisividad solar en función del día del año. A partir de aquí escogemos los coeficientes a utilizar para minorar esta propiedad. Destacar que estas fechas pueden sufrir ligeras variaciones al empezar a simular, para intentar adaptarnos mejor a las necesidades climáticas del invernadero. Añadir que la última franja, con las fechas comprendidas entre el 30 de Junio y el 23 de Agosto, en las cuales el invernadero está cerrado, el valor del blanqueamiento puede variar dado que no se realiza un mantenimiento de este, sin embargo no afectará a nuestro análisis.

Tabla 5. Tabla con valores de transmisividad a lo largo de la simulación.

Transmisividad	Fecha inicial	Fecha final
0.44	23 Agosto (5640h)	13 Septiembre (6144h)
0.88	13 Septiembre (6144h)	1 Marzo (10176h)
0.44	1 Marzo (10176h)	30 Junio (13104h)
0.44	30 Junio (13104h)	23 Agosto (5448h)

En este caso, la fecha que tomamos es la del 23 de Agosto, donde iniciamos la simulación, punto en el que consideramos que las plantas ya han brotado y deben estar en los márgenes de temperatura establecidos. La fecha de fin de simulación es el 30 de Junio.

3.3.3 Propiedades del material obtenido

Introducimos los valores anteriores en window 7.4, obteniendo dos materiales distintos, uno para el caso blanqueado, y otro sin el blanqueado.

Decidimos utilizar un espesor total de 0.20mm, dado que es el valor más utilizado en los invernaderos de la zona, obteniendo:

- 1 capa de 0.2mm sin blanquear: $U= 2.26 \text{ W/m}^2\text{K}$; $G= 0.885$
- 1 capa de 0.2mm blanqueado: $U=2.26 \text{ W/m}^2\text{K}$; $G=0.445$

Se ha comprobado que los valores de U y G obtenidos para la caracterización del PEBD son similares a los utilizados en otros trabajos de simulación de invernaderos con Trnsys [31].

Tras generar este nuevo material, debemos añadirlo al archivo producido a la biblioteca de Trnsys, copiando el contenido del archivo generado por window y lo añadiéndolo al archivo de la biblioteca original, el cual al actualizarla en Trnsys nos aparece el nuevo tipo de ventana diseñado.

3.4 Ventilación

3.4.1 Ventilación natural

Destacar que en los invernaderos existe una ventilación natural, ya sea voluntaria, al abrir las ventanas existentes para reducir la humedad o refrigerar el invernadero; o involuntaria, debido al aire que entra por infiltraciones en puerta, cubierta, etc.

Definimos la ventilación natural, producida por el efecto de tener parte de las ventanas del invernadero abiertas.

Para ello utilizamos el comando infiltración que encontramos en el type 56, donde podemos dar un valor constante, una función o un "Schedule" para que varíen en función de las horas. Aquí se introduce la tasa de renovaciones por hora que se calculará posteriormente, tanto debida a la ventilación al abrir ventanas como por las infiltraciones.

En nuestro caso, y siguiendo las recomendaciones del "Instituto de Investigación de y Formación Agraria de la consejería de agricultura de Andalucía" introduciremos los valores típicos de apertura de ventanas en función de la época del año. Desde el 13 de Septiembre hasta el 31 de Octubre las ventanas abren de 8 de la mañana hasta las 6 de la tarde. Desde el 1 de Noviembre hasta el 28 de Febrero las ventanas abren de 12 de la mañana a 4 de la

tarde. Destacar que por temperatura sería preferible abrir menos horas, pero esta rutina se realiza para ventilar el invernadero y reducir la humedad relativa interior. Finalmente desde el 1 de Marzo hasta el 12 de Septiembre se mantienen las ventanas abiertas las 24 horas del día.

Para introducir estos valores, se generan mediante el Type 14-h diversas funciones dando los meses del año que queremos tener cada horario y generamos unos schedules con los horarios de apertura para cada día. Recordar que para las ventanas cerradas seguirá habiendo una infiltración, dado que la cubierta plástica no aísla totalmente

A partir del artículo "Natural Ventilation of Parral Greenhouses" [11], marcamos las tasas de ventilación para el caso de ventanas abiertas. Dado que utilizamos el mismo invernadero que el del estudio, podemos utilizar directamente los valores de caudal volumétrico de aire que aparecen en el artículo. A continuación mostramos dos gráficos en los que se muestra ratio de ventilación total y por superficie de área de ventilación (ente techo y paredes un total de 190.75m²).

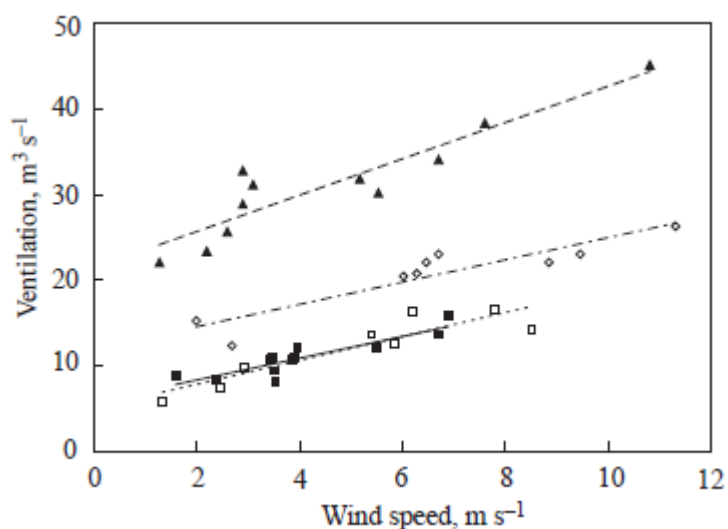


Figura 26. Ratios de ventilación para ventilaciones con cubierta enrollable: \blacktriangle --- techo y pared; \diamond --- pared; \blacksquare --- techo (barlovento); \square --- techo (sotavento) [11].

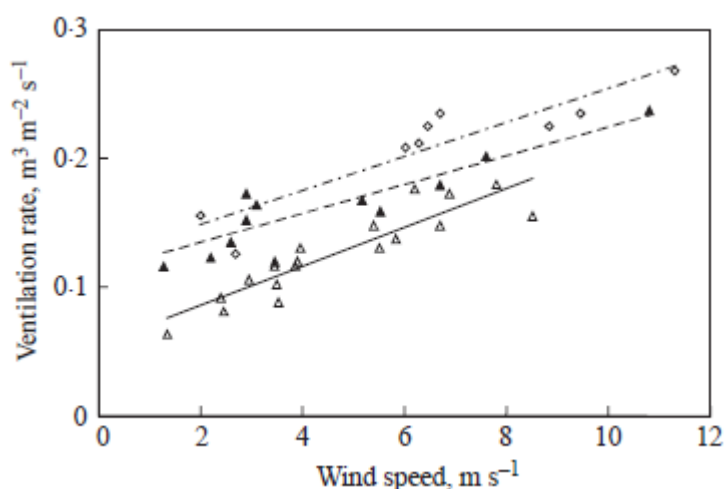


Figura 27. Ratios de ventilación en función del área de las oberturas. Fuente: "Natural Ventilation of Parral Greenhouse". \diamond --- pared lateral; \blacktriangle --- techo y pared lateral; \triangle --- techo [11].

En nuestro caso, que consideramos oberturas enrollables para paredes y techo, deberíamos fijarnos en los triángulos negros. Considerando una velocidad media del viento de 4m/s podemos asignar una ventilación de 30m³/s. A partir de este valor, y con el volumen total de 3438.24m³ que nos da Trnsys para nuestro invernadero. Calculamos la tasa renovaciones por hora.

$$T.R. = Q \cdot \frac{3600s/h}{V} = 30m^3/s \cdot \frac{3600s/h}{3438.24m^3} = 31.4ren/h \quad (2)$$

Para determinar la infiltración que se produce con ventanas cerradas partimos de la tabla que se muestra en el documento "Protocolo de auditoria energética en invernaderos" [13].

Tipo de cubierta	R (h ⁻¹)
Nueva construcción	
Láminas de plástico	0,75-1,0
Vidrio o fibra de vidrio	0,5-1,0
Construcciones antiguas	
Vidrio o fibra de vidrio	1-2
Láminas de plástico	2-4

Figura 28. Tasas de renovación de aire por infiltración a través de la estructura [13].

En nuestro caso utilizaríamos el valor de láminas de plástico, que puede variar entre 0.75 y 1. Utilizaremos el valor más crítico, 1.

3.5 Cargas térmicas

A continuación se presentan las diferentes cargas que deben considerarse para evaluar la energía calorífica que se introduce o se pierde en el invernadero.

En primer lugar mostramos de forma simplificada la ecuación del balance de energía en el invernadero:

$$\underbrace{R_n + Q_{cli}}_{\text{Energía ganada}} = \underbrace{Q_{cc} + Q_{ren} + Q_{evp} + Q_{sue}}_{\text{Energía perdida por el aire del invernadero}} \quad (W)$$

Figura 29. Ecuación del balance de energía en el invernadero [12].

Donde:

Rn: Radiación neta

Qcli: Calor aportado por los equipos de climatización

Qcc: Calor convección-conducción

Qren: Calor aportado al renovar el aire interior

Qevp: Calor aportado debido a la evapotranspiración de las plantas

Qsue: Calor perdido aportado por el suelo

Podemos ver las diversas cargas en la siguiente figura.

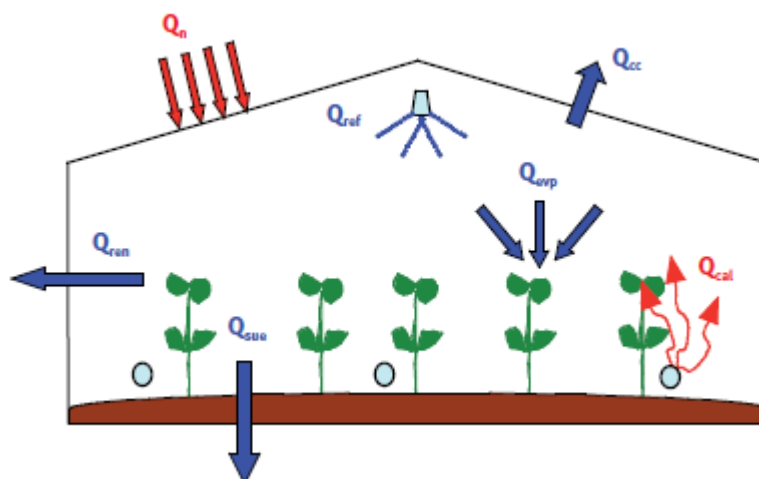


Figura 30. Balance energético en un invernadero [12].

Podemos ver el detalle del cálculo de cada uno de estos términos en el Anexo 1. En este se muestran alternativas a considerar, tablas, figuras y las ecuaciones utilizadas para calcular los valores a introducir en sus correspondientes apartados. A continuación se muestra un breve resumen de los puntos a tener en cuenta.

3.5.1 Radiación neta

Se considera que la radiación neta absorbida por el invernadero es igual a la energía absorbida por la cubierta, por el suelo y por las plantas.

Para ello debe estar definido el coeficiente de absorción de los 3 elementos anteriormente citados.

Destacar además que deberemos considerar la fracción del suelo cubierta por las plantas para conocer, según el crecimiento del cultivo, la cantidad de radiación que llega al suelo o si antes esta ha impactado en las plantas.

3.5.2 Calor sensible perdido por renovación de aire

La entrada de aire procedente del exterior supone una pérdida o ganancia de energía según la diferencia de temperatura y humedad en el exterior.

Estas variaciones las modelamos en Trnsys mediante la tasa de renovación de aire, donde se tiene en cuenta tanto la ventilación a través de las ventanas como la infiltración.

3.5.3 Intercambio de calor con el suelo

Una parte de las pérdidas de calor en el invernadero, alrededor del 10%, se producen a través del suelo. Aportando las características del suelo a Trnsys se realizará el cálculo de estas.

- Conductividad: 3.6 kJ/h·m·K [12].
- Densidad: 1130 Kg/m³ [32]
- Capacidad: 1.06 KJ/Kg·K [32].

Además, mediante el Type 77 conoceremos la temperatura del suelo en la superficie y en la profundidad a considerar, de tal forma que Trnsys calcule la transferencia de calor que hay entre el suelo y el invernadero.

3.5.4 Calor perdido por conducción-convección

En los intercambios energéticos por conducción-convección entre el interior del invernadero y el ambiente exterior, Trnsys calcula el calor que pasa por unidad de superficie de cubierta en función de las propiedades de los materiales de cubierta:

- U value
- G value
- Espesor de la cubierta

3.5.5 Calor latente consumido en la evapotranspiración de las plantas

Se trata del calor latente que consumen las plantas para evaporar el agua generada en la transpiración.

En los últimos años, se han realizado muchos estudios para tratar de conocer con exactitud este valor. En nuestro caso, dado que no podemos parametrizar el invernadero, conociendo humedades relativas previas al estudio, velocidades viento en el interior, etc., utilizaremos una expresión simplificada [34], donde la evapotranspiración dependerá solo de la radiación neta que llega a las plantas y del día del año.

Para los días del 1 al 220 ($JD < 220$):

$$ET_0/R_s = 0.288 + 0.0019 \cdot JD \quad (8)$$

Para los días del 220 al 365 ($JD > 220$):

$$ET_0/R_s = 1.339 - 0.00288 \cdot JD \quad (9)$$

3.5.6 Energía calorífica a aportar o eliminar en el invernadero

Es la cantidad de calor que es necesario suministrar mediante medios de calefacción o que hay que eliminar del invernadero con los sistemas de refrigeración para mantener la temperatura deseada.

3.6 Comparación efecto evapotranspiración

Con este aparatado se pretende comparar los resultados de una simulación de 48 horas que tomaremos entre la hora 2880 y la 2928 (días 1 y 2 de Marzo que serían los días 120 y 121), sin ningún efecto de evapotranspiración (invernadero vacío) y con evapotranspiración para el invernadero blanqueado y sin blanquear.

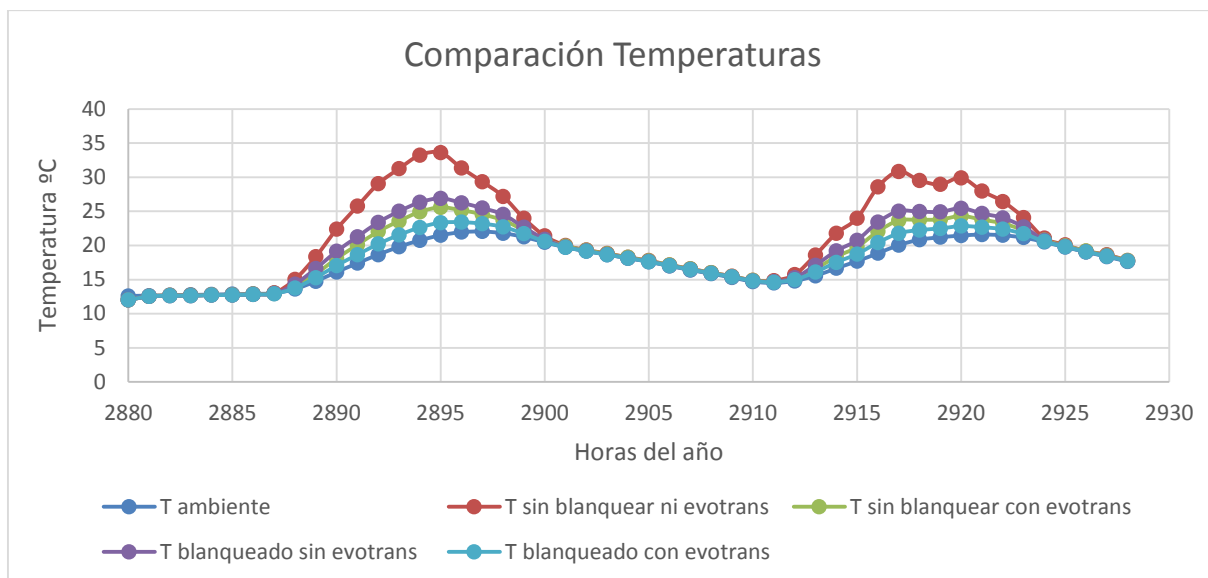


Figura 31. Comparación de las temperaturas del interior del invernadero para los días 1 y 2 de Mayo blanqueado y sin blanquear con y sin el efecto de la evapotranspiración.

Principalmente debemos destacar que el caso más crítico es el invernadero sin blanquear y sin tener en cuenta la evapotranspiración, donde tendríamos una gran acumulación de calor, seguido de blanqueado sin evapotranspiración, sin blanquear con evapotranspiración y finalmente blanqueado con evapotranspiración. Estos tres últimos casos tienen menos diferencias de temperatura que el primero.

Si comparamos la situación real del invernadero para estas fechas, blanqueado con evapotranspiración respecto al modelo simple que no se tienen en cuenta ambos factores, tenemos una diferencia de temperatura de más de 10°C. Por tanto queda clara la importancia de realizar un modelo teniendo en cuenta todos estos parámetros, cuya influencia térmica será superior a la de los equipos a instalar.

Los mismos comentarios sirven para las humedades relativas que se dan en el invernadero, teniendo diferencias de hasta un 40% de la humedad relativa del invernadero sin blanquear con evapotranspiración al invernadero blanqueado sin evapotranspiración.

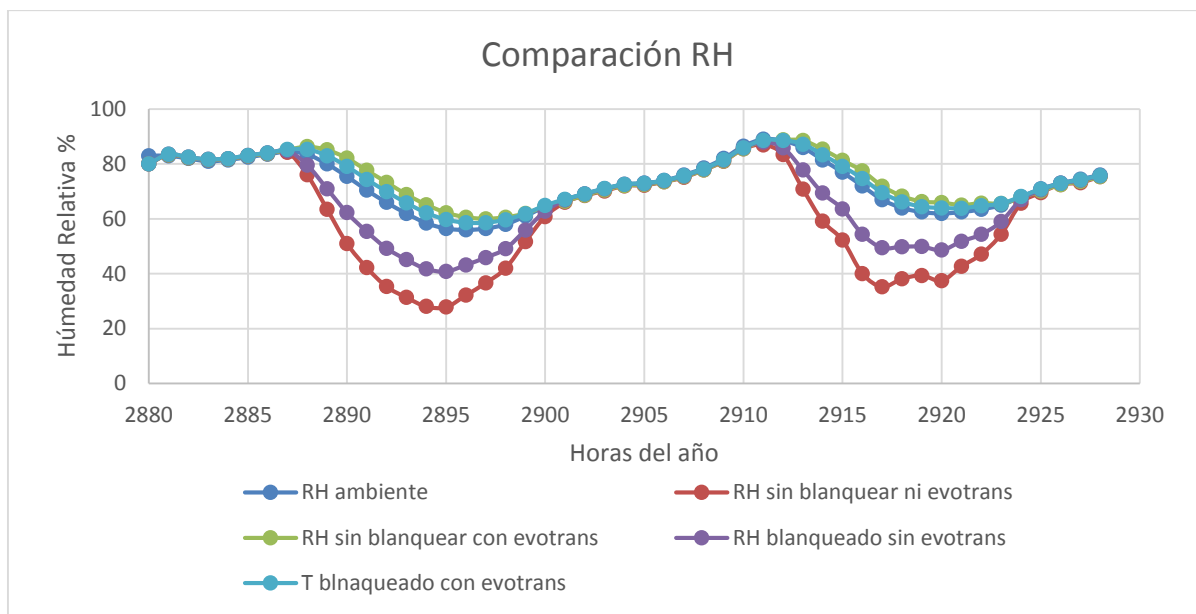


Figura 32. Comparación de la Humedad Relativa del interior del invernadero para los días 1 y 2 de Mayo blanqueado y sin blanquear con y sin el efecto de la evapotranspiración.

Por tanto destacamos la importancia de escoger un buen modelo para realizar la simulación, ya que vemos que las diferencias entre ellos son notables y el efecto de las plantas es uno de los factores claves en la climatización del invernadero.

3.7 Optimización mediante técnicas pasivas

En primer lugar, y a partir de los parámetros que hemos citado previamente, realizamos unas simulaciones sin añadir equipos que puedan regular la temperatura del invernadero. Estas simulaciones tienen por objetivo conocer las condiciones de partida del invernadero y tener una base para poder comparar los resultados obtenidos en cada caso respecto a la situación inicial.

Además, se realizarán diversos modelos. Se empieza por uno más básico con las condiciones típicas para los invernaderos descritas bibliografía. En función de los resultados obtenidos en estas se aplicarán ligeras variaciones que faciliten el trabajo de los equipos que vayamos a instalar.

En este apartado mostramos un resumen de toda la información obtenida, la cual aparece con más detalle en el apartado 2 del Anexo 1, donde podremos encontrar los gráficos comparando los valores de humedad relativa y temperatura interior y exterior, solo los valores de temperatura y humedad del interior del invernadero y además también un estudio detallado para 48 horas donde se podrá observar detalladamente la evolución de los días 25 y 26 de Febrero, donde podremos observar con mayor facilidad los valores que nos aporta Trnsys cada hora y las diferencias entre los diversos modelos.

Los modelos realizados se basan en la siguiente estructura de types creada en Trnsys

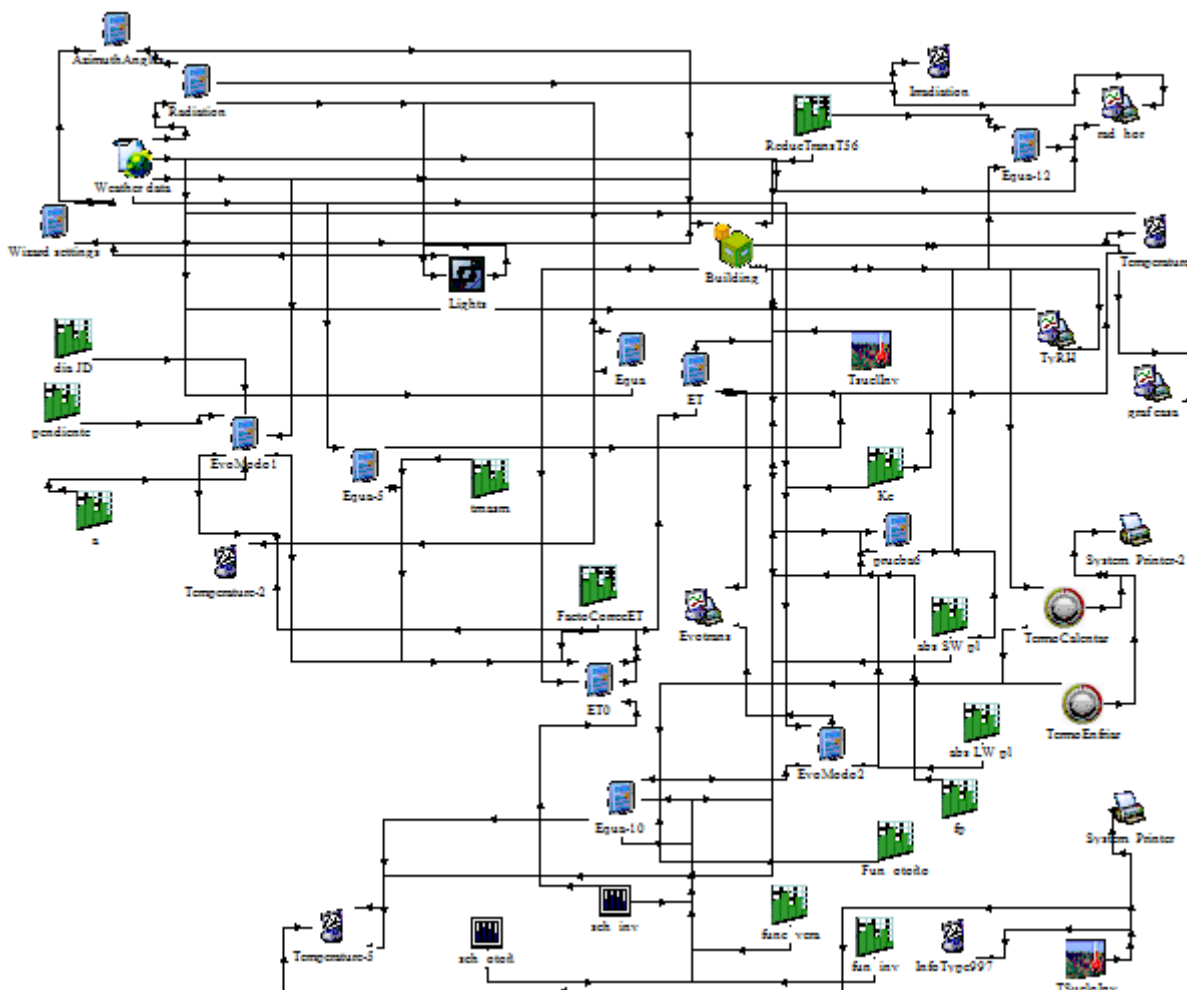











Figura 33. Disposición de los diversos types para la simulación del modelo del invernadero sin ningún sistema de climatización.

En la que se han utilizado los siguientes Types que mostramos en la tabla:

Tabla 6. Types utilizados en el “modelo invernadero”.

Type	Función	Recibe de	Envía a
 Ecuación	Permite realizar ecuaciones con parámetros de otros types. Es un type completamente abierto donde se pueden poner entradas y salidas al gusto.	Interacción abierta	Interacción abierta
 Weather data	Archivo que carga los datos climáticos de la ubicación deseada		Type 56
 Building	Es la “casa”, en nuestro caso el invernadero. A este Type se le dan todas las propiedades que definan el edificio a simular y se vincula con el resto de types	Weather data Type 77 Type 14 h	Ecuación Type 65a

Type 56	que aporten calor o puedan realiar cualquier tipo de interacción sobre el invernadero.	Ecuación Type 517	Type 65d (sin file) Type 25d Type 1502 Type 1503
 Type 517	Schedule que permite establecer rutinas en las diversas franjas horarias para cada día.	Type 14h	Ecuación Type 56
 Type 1502	Termostato para calentar	Type 56	Type 65d Ecuación Type 56
 Type 1503	Termostato para enfriar	Type 56	Type 65d Ecuación
 Type 14h	Permite asignar valores a lo largo del tiempo de simulación. Muy útil para vincular con otros types mediante el generador de ecuaciones		Ecuación Type 56
 Type 25d	Impresión de la evolución durante el tiempo de simulación de los parámetros marcados. Da un archivo txt.	Varios (todos aquellos parámetros que deseemos)	
 Type 65a	Impresión de la evolución durante el tiempo de simulación de los parámetros marcados. Da un archivo txt y permite visualizar la evolución.	Varios (todos aquellos parámetros que deseemos)	
 Type 65d	Impresión de la evolución durante el tiempo de simulación de los parámetros marcados. Permite visualizar la evolución.	Varios (todos aquellos parámetros que deseemos)	
 Type 77	Permite conocer la temperatura del suelo a la profundidad deseada.		Type 56

Estos types se pueden encontrar explicados con mayor detalle en el Anexo 4.

3.7.1 Modelo 1

Tras seleccionar en el type Weather data el clima de Almería, los parámetros de ventilación natural, características del suelo, la superficie del suelo que cubren las plantas, los materiales de cubierta, la evapotranspiración y los coeficientes de absorción de las plantas con las fechas

y valores comentados previamente, realizamos una primera simulación. A continuación mostramos los gráficos de la evolución de las Temperatura y la humedad relativa tanto interior como exterior.

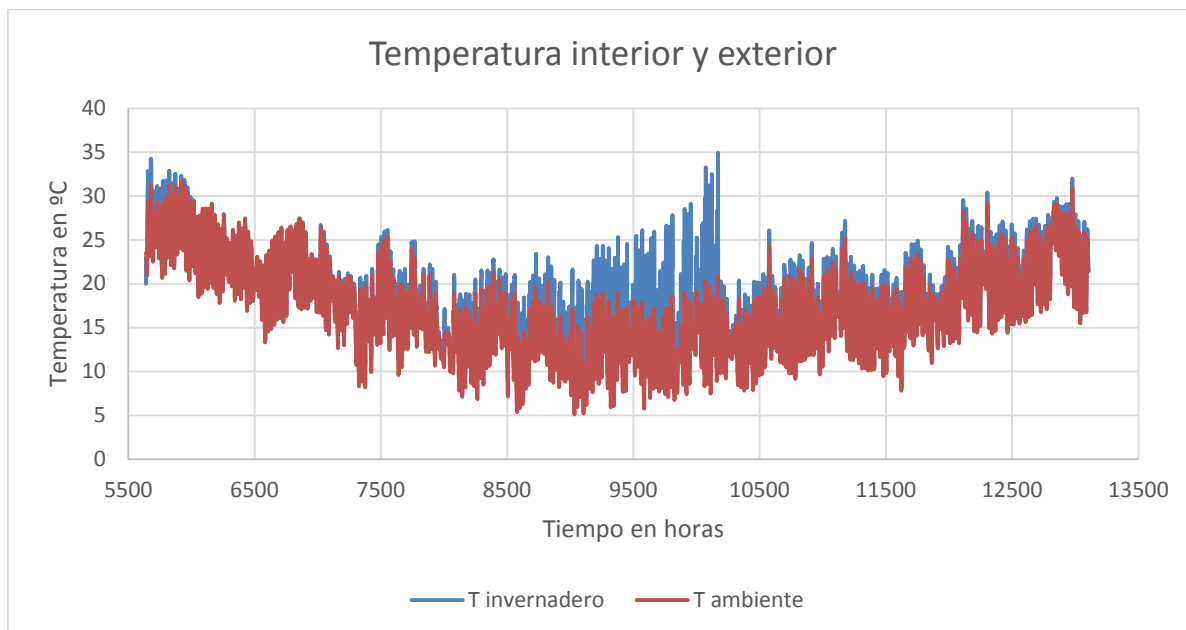


Figura 34. Gráfico con los perfiles de temperaturas en el interior y exterior del invernadero a partir de las condiciones iniciales.

Comparando la temperatura interior con la exterior se aprecia que son excepcionales los casos en los que la temperatura interior sea inferior a la exterior. Puede haber algunas horas que se dé este caso, a primera hora de la mañana debido a la inversión térmica que provoca el efecto de evapotranspiración.

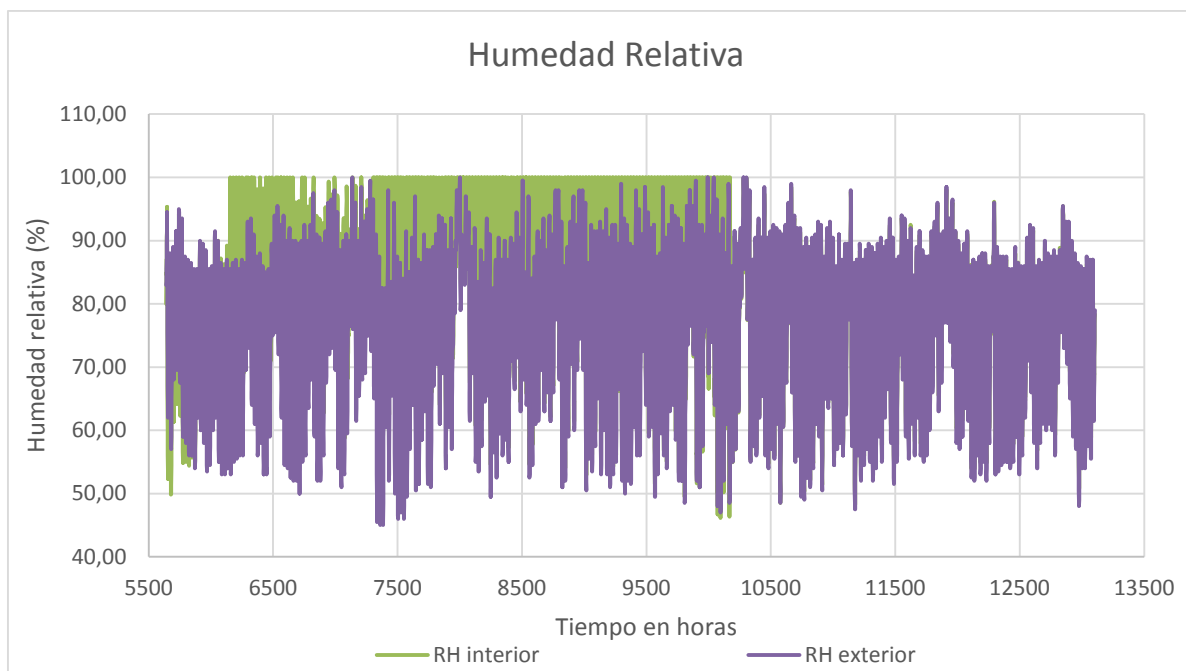


Figura 35. Gráfico con los perfiles de humedad relativa en el interior y exterior del invernadero a partir de las condiciones iniciales.

A continuación mostramos la evolución de las temperaturas y humedad relativa para los días 25 y 26 de Febrero.

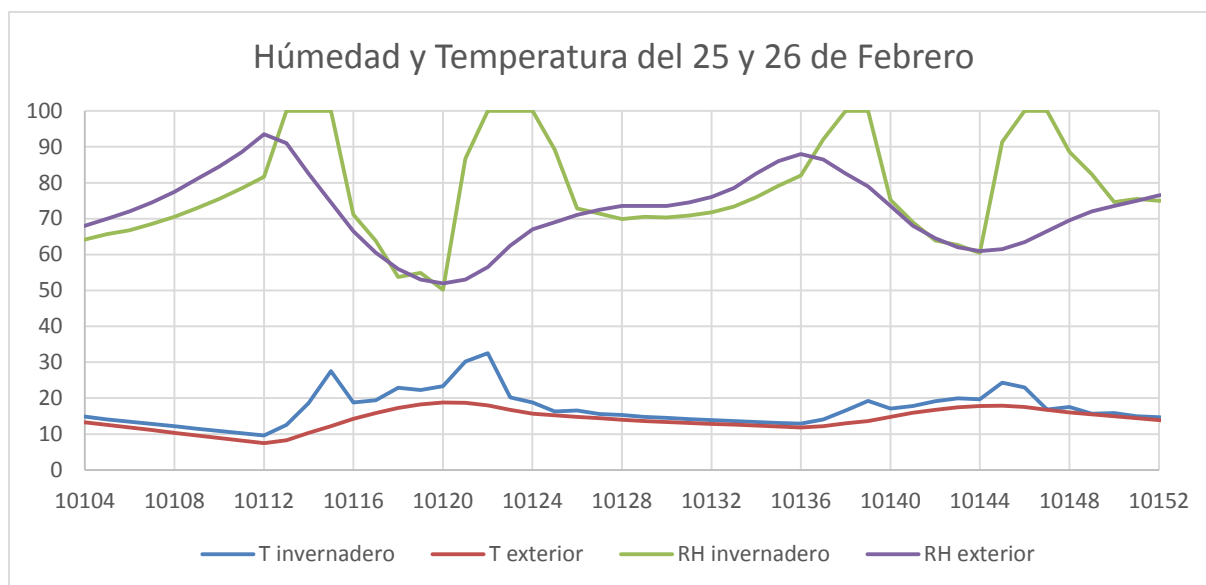


Figura 36. RH y T de los días 25 y 26 de Febrero en el interior del invernadero y en el exterior para el Modelo 1.

En este gráfico podemos ver claramente como antes de las 12 (10116) y después de las 16 horas (10120), cuando las ventanas están cerradas, se disparan las temperaturas sobrepasando los 20 grados, e incluso llegando a los 30°C. Además el aumento de humedad relativa al tener cerradas las ventanas provoca que estemos en estas franjas de máxima temperatura con una humedad relativa del 100%.

Para poder interpretar mejor esta información, en el apartado 2 del Anejo 1 puede verse una tabla donde contabilizamos el número de horas donde se superan los 30°C y 26°C y se baja de 12°C y de 8°C, temperaturas, siendo estas el rango de temperaturas óptimas y las temperaturas máximas y mínima biológica, donde se para el crecimiento del cultivo. Además indicaremos Las horas que estamos fuera de los valores aconsejados de humedad relativa (entre 40 y 80%). Se estudiará esta información desde el 23 de Agosto, día en el que consideramos que se realiza el trasplante hasta el 31 de mayo, fecha final actual de cultivo; y hasta el 30 de junio, para observar si al instalar el equipo hay una mejora apreciable este último mes y merecería la pena alargar la temporada.

3.7.2 Modelo 2

Repetimos la simulación adelantando las fechas de blanqueo, lo que se traduce en una reducción de la transmisividad durante las fechas anteriormente marcadas.

Destacar que nos decantamos por esta opción, y no por aumentar la tasa de infiltración (aumento de la ventilación natural), ya que por la tarde el invernadero ya lo tenemos abierto, es por la noche cuando lo tenemos cerrado en esta época del año, y no nos interesa abrirlo porque durante las primeras horas del día por esta época aún tenemos bajas temperaturas, lo que nos podría provocar un descenso en el interior, generando una demanda de calor innecesaria.

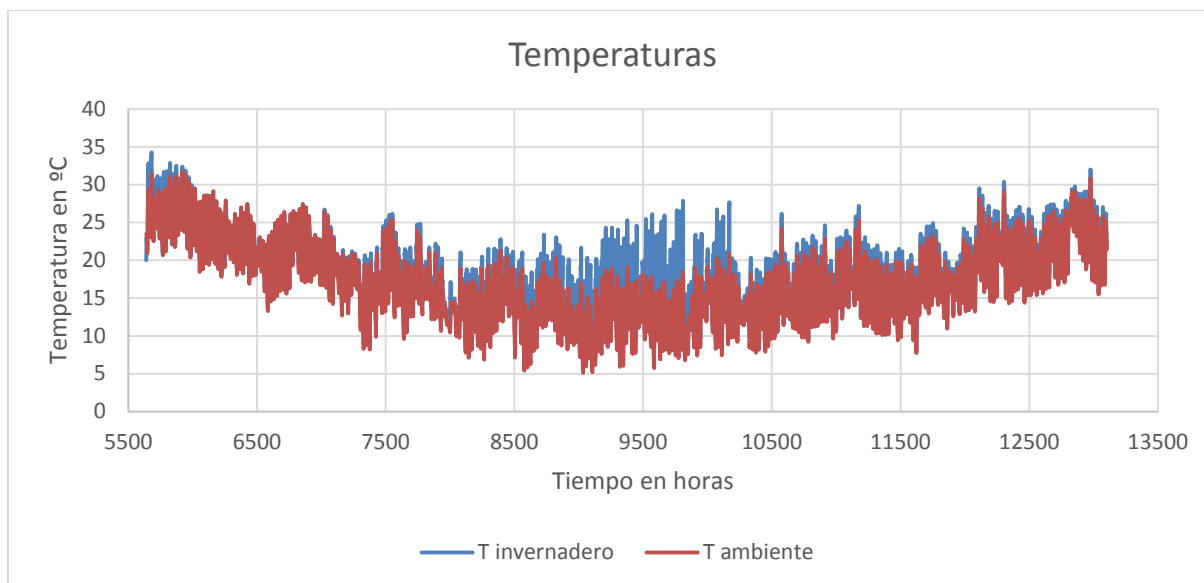


Figura 37. Gráfico con los perfiles de temperaturas en el interior y exterior del invernadero adelantando la fecha de blanqueo inicial.

Podemos ver como la variación realizada evita que en el mes de Febrero alcancemos temperaturas superiores a los 30°C.

En la siguiente grafica podemos ver cómo para los días 25 y 26 de Febrero los cambios realizados consiguen, respecto al caso anterior, un descenso de las temperaturas.

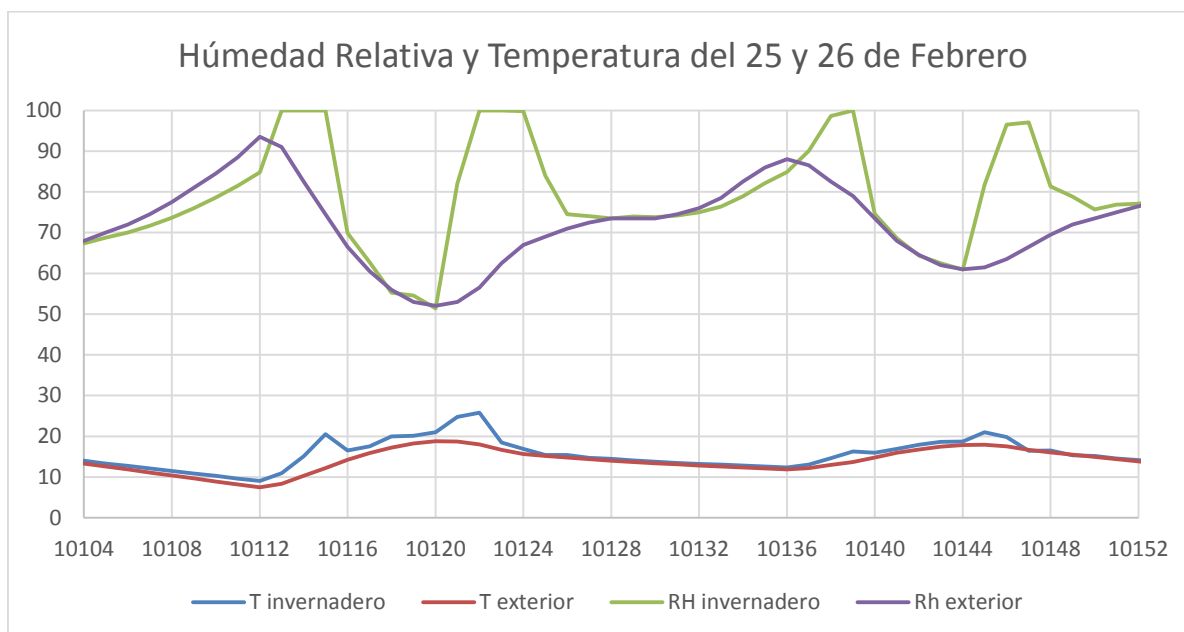


Figura 38. RH y T de los días 25 y 26 de Febrero en el interior del invernadero y en el exterior para el Modelo 2.

3.7.3 Modelo 3

En este caso, realizamos una variación sobre las tasas de infiltración a utilizar para ayudar a los futuros sistemas de climatización a instalar. En este caso programamos el invernadero para que, independientemente de la hora o estación del año, cuando la temperatura interior baje de 12°C, se cierren las ventanas, reduciendo la tasa de infiltración de 31.4 (ventanas abiertas) a 1 (perdidas con ventanas cerradas).

Esta variación se realiza para evitar pérdidas de calor cuando sea necesario aumentar la temperatura interior del invernadero. Si deseásemos calentar éste con las ventanas abiertas, tendríamos una baja eficiencia, desperdiciando el aporte de calor de nuestros equipos.

Para el caso en que las temperaturas pasen de 30°C no cerraremos las ventanas, porque aunque el intercambiador tierra aire pueda aportar aire frío, aumentaría el "efecto invernadero", acumulándose más calor del que podríamos disipar con el equipo (destacar que según información recibida por parte de los productores, en los meses de verano con el invernadero cerrado se llegan a pasar los 50°C).

A continuación mostramos la evolución de la humedad relativa y las temperaturas en este tercer modelo para los días 25 y 26 de febrero.

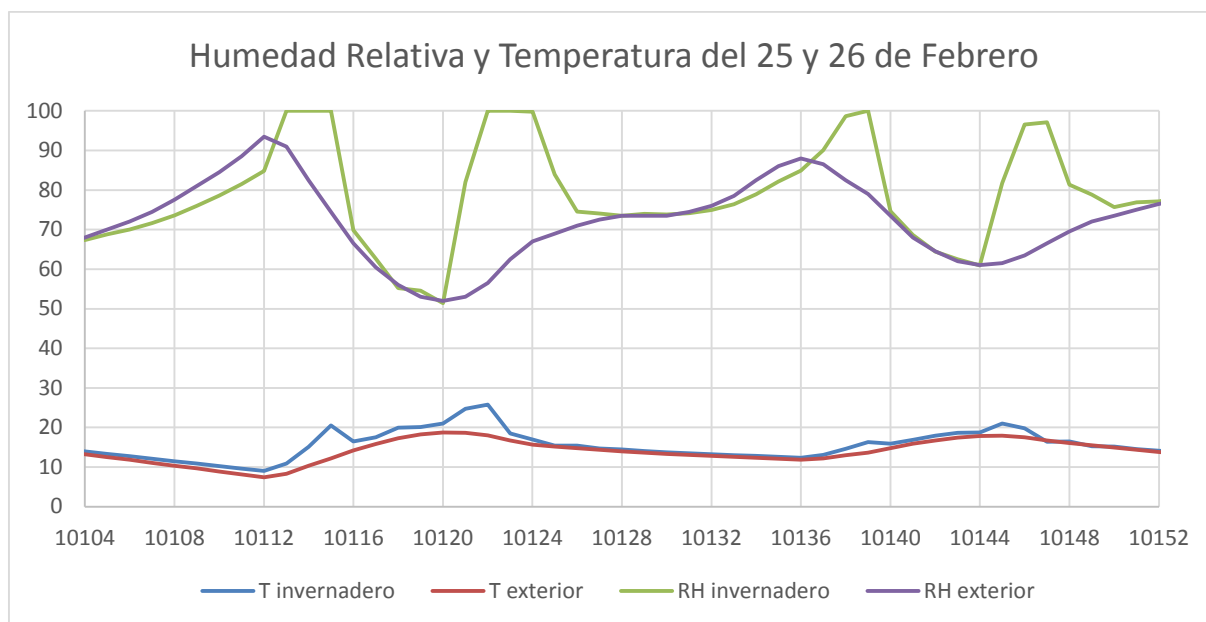


Figura 39. RH y T de los días 25 y 26 de Febrero en el interior del invernadero y en el exterior para el Modelo 3.

En este caso, como las horas en las que bajamos de 12°C ya coinciden con las que estaban previamente establecidas para tener el invernadero cerrado, no observamos diferencias respecto al modelo anterior.

3.8 Análisis de los diversos modelos

A continuación se comparan los resultados obtenidos para los 3 modelos realizados. Mostraremos dos comparaciones, hasta la hora 12384 (31 de Mayo) y hasta 13104 (30 de Junio)

Tabla 7. Tabla comparativa con temperaturas y humedades relativas de los diversos modelos del 23 de Agosto al 31 de Mayo.

Fechas simulación (h)	5640-12384		
Modelo	1	2	3
Suma horas simulación	6744	6744	6744
Horas T> 26º	385	368	368
Horas T> 30º	93	86	86
Horas T< 12º	779	790	777
Horas T< 8º	25	25	24
Horas RH>80	2934	2937	2921
Horas RH<40	0	0	0

Tabla 8. Tabla comparativa con temperaturas y humedades relativas de los diversos modelos del 23 de Agosto al 30 de Junio.

Fechas simulación (h)	5640-13104		
Modelo	1	2	3
Suma horas simulación	7464	7464	7464
Horas T> 26º	542	525	525
Horas T> 30º	100	93	93
Horas T< 12º	779	790	777
Horas T< 8º	25	25	24
Horas RH>80	3163	3166	3150
Horas RH<40	0	0	0

Comprobamos como el modelo 3, el cual recibe la variación sobre las fechas, adelantándolo dos semanas sobre las inicialmente establecidas, y el cierre de ventanas automáticas cuando las temperaturas bajan de 12º, reduce las horas por debajo de 12º y por encima de 30º. Además, el cierre de las ventanas que se realiza, ayudará a la futura climatización mediante equipos que realicemos, evitando que el calor que aportemos al sistema se escape de nuestro invernadero.

4 Modelo con intercambiador tierra-aire (EAHE)

En este apartado se procede a realizar el estudio de las simulaciones con el intercambiador tierra-aire conectado al invernadero.

El objetivo marcado para la instalación es entrar a aportar calor cuando las temperaturas bajen de 12°C y evitar que estas bajen de 8°C, la temperatura mínima biológica de las plantas. Además se intentará evitar pasar de los 30°C, activando el equipo a los 28°C.

Destacar que el sistema de control de temperatura, el cual manda activar y desactivar al sistema de climatización (en este caso encenderá los ventiladores) se le introduce un margen de error en las temperaturas de $\pm 1^\circ\text{C}$. De esta forma se modela un posible error de histéresis del instrumento de medición de temperatura y también evitamos que el sistema se encienda y se apague constantemente. Otro punto a tener en cuenta es el hecho de que nosotros asumimos toda la temperatura en un nodo, realizando los cálculos suponiendo una mezcla perfecta del aire y una temperatura homogénea. Dado que los ventiladores se encuentran todos en un lado, podríamos tener una pequeña diferencia de temperaturas en la realidad en función de la altura, distancia de las paredes y de la impulsión de los ventiladores.

A la hora de realizar la instalación del equipo, la hipótesis de partida para realizar las simulaciones es que este estará a 2 metros de profundidad. Además utilizaríamos 4 equipos, separados, utilizando 4 ventiladores. De esta manera se consigue mejor distribución del calor, una caída de presión total menor, podemos utilizar ventiladores de menor potencia y colectores de menor diámetro, reduciendo el coste de la instalación. Destacar que para simplificar el cálculo, a la hora de introducir el equipo en Trnsys, suponemos que es uno cuyo número de tubos y caudal total corresponde con la suma de los 4 que colocamos nosotros. Para los ventiladores la potencia y caudal introducimos los valores de la suma de los 4 como 1. Los 4 equipos que instalaremos serán idénticos. La única excepción que podemos tener es, en función del número de tubos que algún equipo pueda tener un tubo menos, pero supondremos la misma caída de presión total, dado que la mayor parte de la caída de presión se da en los accesorios y en el colector, pudiendo despreñar este punto para simplificar el cálculo.

Para realizar los diseños de las diferentes disposiciones de tubos, se parte de los tubos con menor diámetro (0.250m), probando la mínima y máxima velocidad del aire recomendada (1 y 5 m/s) colocando los tubos en las dos direcciones posibles. Se considera que con los tubos de menor diámetro conseguimos mayor superficie de intercambio por kg/aire y por tanto mayor ΔT a la salida del equipo, y pese a que el caudal total sea menor que con tubos mayores, la hipótesis de partida es que con tubos pequeños tendremos mayor intercambio de calor. Se ocupará toda la superficie del invernadero de tubos, colocando los máximos posibles que nos permita el ancho teniendo en cuenta la separación de 4 veces el diámetro, y con una longitud igual a la del invernadero.

En caso de obtener resultados satisfactorios, se probarán disposiciones con tubos de mayor diámetro con el objetivo de reducir la inversión inicial al reducir el número de tubos. Se irán probando sucesivamente velocidades menores para cada diámetro para reducir el incremento de presión que debe aportar el ventilador, y así utilizar uno de menor potencia.

Destacar que pese a que en las primeras simulaciones probemos con las disposiciones de tubos longitudinales y transversales (de 23 y de 38 metros de longitud), si con los tubos más cortos obtenemos resultados satisfactorios, los siguientes cálculos solo se realizarán con esta disposición, debido a que se consigue una mejor distribución del aporte de calor dentro del invernadero. Destacar que este punto no lo tiene Trnsys en consideración al tener tan solo un nodo de cálculo, suponiendo una mezcla perfecta del calor aportado indiferentemente de la velocidad de salida del caudal o del tamaño del invernadero.

4.1 Energía calorífica a aportar o eliminar en el invernadero

Al realizar esta simulación, añadimos una carga de calor/frío sobre las comentadas previamente en el apartado 3.5, que se resumían en la siguiente expresión:

$$\underbrace{R_n + Q_{cli}}_{\text{Energía ganada}} = \underbrace{Q_{cc} + Q_{ren} + Q_{evp} + Q_{sue}}_{\text{Energía perdida por el aire del invernadero}} \quad (\text{W})$$

Figura 40. Ecuación del balance de energía en el invernadero [12].

En este caso, mediante el EAHE modelamos el Q_{cli} . Añadimos esta carga al Type56, que es nuestro invernadero, mediante una ventilación forzada con la temperatura, humedades relativas y caudales calculados previamente. De esta forma se añade toda la información desde el ventilador, que se encuentra en la impulsión, colocándolo entre el type 997 (el EAHE) y el type 56 (el ventilador).

Para simplificar el funcionamiento de los modelos, mostramos el siguiente diagrama con los 3 types principales de Trnsys y entender como pasa la información entre ellos.

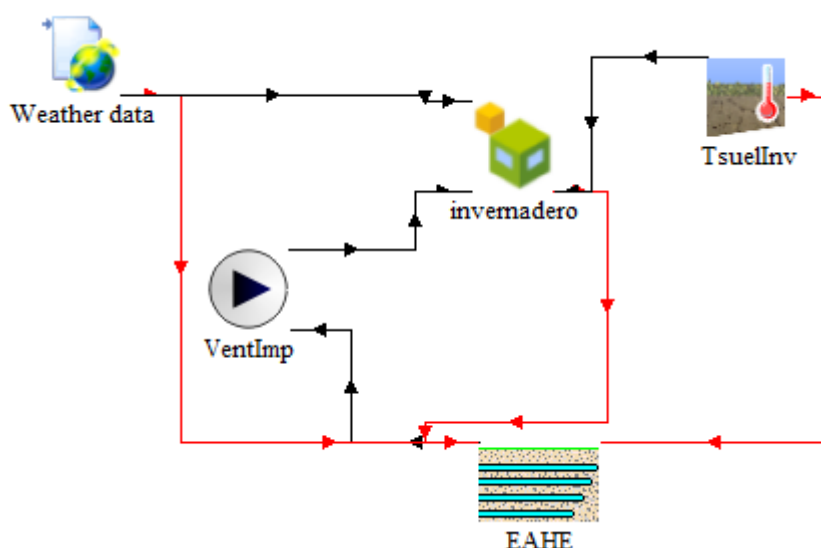


Figura 41. Esquema básico de funcionamiento y gestión de la información de los diferentes modelos.

Mediante este esquema básico podemos ver como el EAHE coge información del invernadero para calcular el aporte de calor. Posteriormente el ventilador, a la salida del EAHE recoge la información calculada para reenviarla de nuevo al invernadero en forma de un nuevo input. Además debemos destacar que tanto el invernadero como el EAHE recogen información externa con las condiciones ambientales, las cuales deberán ser tratadas para adecuarse a las condiciones reales de nuestro modelo.

4.2 Cálculo de la pérdida de carga

Para poder definir los requerimientos de los ventiladores de nuestra instalación, debemos definir la pérdida de carga que tendríamos en cada instalación.

Consideraremos que la pérdida de carga que tenemos se da en 3 puntos:

- Colector
- Tubos
- Accesorios

A continuación se muestran las hipótesis y las ecuaciones básicas a tener en cuenta para el cálculo de la pérdida de carga en cada una de estas partes.

4.2.1 Colector

$$\begin{aligned}
 \text{Caída Presión}_{\text{colector}}(Pa) &= f_{\text{colector}} \cdot \left(\frac{38}{n^{\circ}_{\text{ventiladores}}} - 1 + \text{Profundidad} \right) \cdot 2 * V_{\text{colector}}^2 \\
 &\cdot \frac{\rho_{\text{aire}}}{\phi_{\text{colector}} \cdot 2}
 \end{aligned} \quad (16)$$

4.2.2 Tubos

$$\text{Caída Presión}_{\text{tubos}}(Pa) = f_{\text{tubo}} \cdot L_{\text{tubos}} \cdot V_{\text{tubos}}^2 \cdot \frac{\rho_{\text{aire}}}{\phi_{\text{tubo}} \cdot 2} \quad (17)$$

4.2.3 Accesorios

$$\begin{aligned}
 \text{Caída Presión}_{\text{accesorios}}(Pa) &= n^{\circ}_{\text{codos}} \cdot K_{\text{codo}} \cdot \frac{\rho_{\text{aire}}}{2} \cdot V_{\text{colector}}^2 + n^{\circ}_{\text{tubos}} \cdot K_{\text{codo}} \cdot V_{\text{tubo}}^2 \cdot \frac{\rho_{\text{aire}}}{2}
 \end{aligned} \quad (18)$$

4.2.4 Caída de presión total

A partir de la caída de los 3 elementos anteriores calculamos la caída de presión total en cada equipo, y por tanto, la que deberá aportar el ventilador.

$$\text{Caída Presión}_{\text{total}}(Pa) = \frac{n^{\circ}_{\text{tubos}}}{\text{ventilador}} \cdot C.P._{\text{tubos}} + C.P._{\text{colector}} + C.P._{\text{accesorios}} \quad (19)$$

4.3 Estudio de las diversas disposiciones y velocidades

Se estudiará la aportación de calor y el rendimiento de diversas disposiciones. Para ello variaremos velocidades y diámetros. Además, se realizarán pruebas con un número menor de tubos al máximo posible.

Para realizar este estudio, ha sido necesario crear el siguiente archivo de Trnsys con la estructura de types que se muestra a continuación.

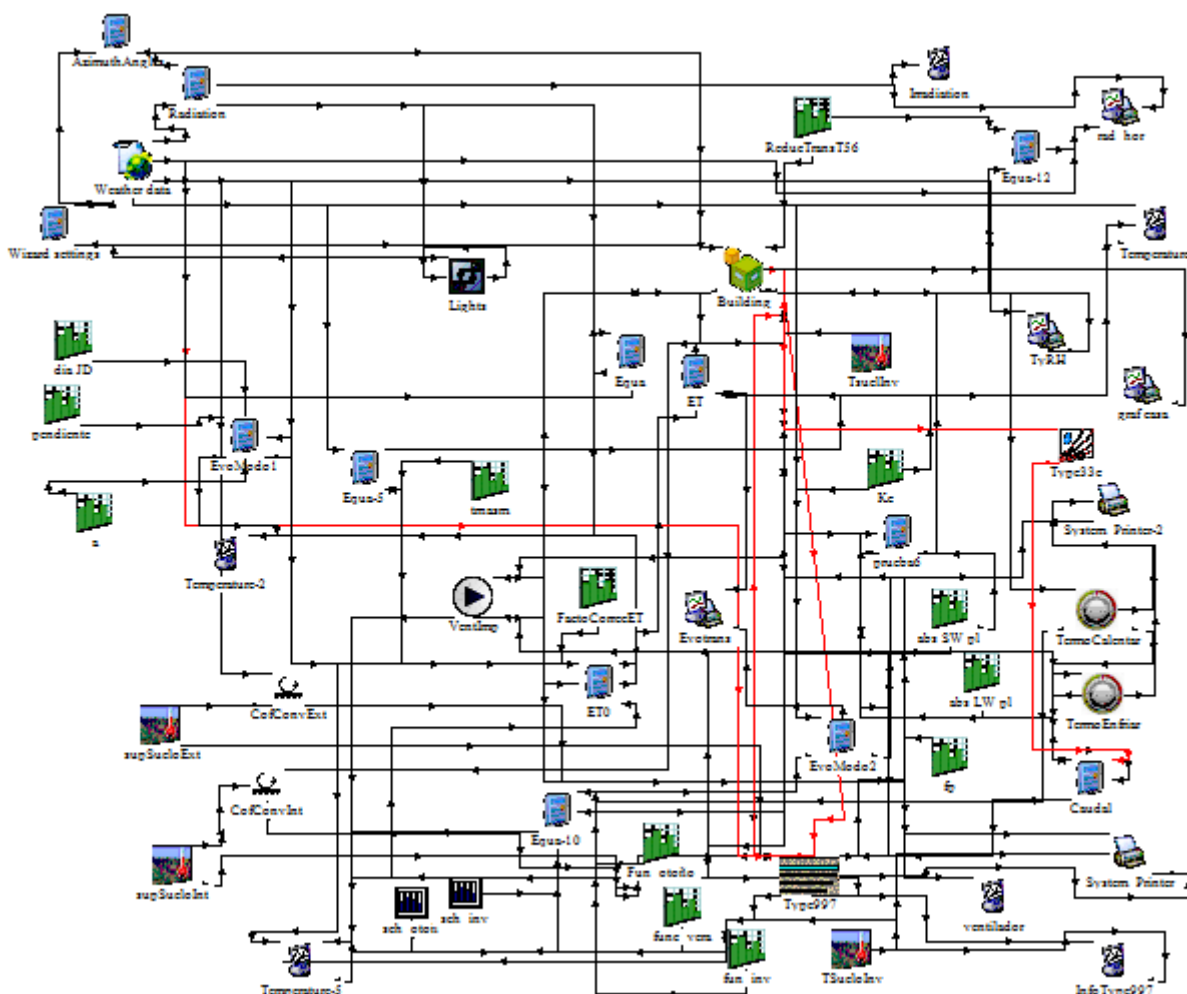
















Figura 42. Disposición de los diversos types para la simulación del modelo del invernadero con el EAHE.

Tabla 9. Types utilizados en el “modelo con EAHE”

Type	Función	Recibe de	Envía a
 Ecuación	Permite realizar ecuaciones con parámetros de otros types. Es un type completamente abierto donde se pueden poner entradas y salidas al gusto.	Interacción abierta	Interacción abierta
 Weather data	Archivo que carga los datos climáticos de la ubicación deseada		Type 56 Ecuaciones Type 25d Type 65a Type 65d

 Type 56	Es la "casa", en nuestro caso el invernadero. A este Type se le dan todas las propiedades que definan el edificio a simular y se vincula con el resto de types que aporten calor o puedan realizar cualquier tipo de interacción sobre el invernadero.	Weather data Type 77 Type 14 h Ecuación Type 517 Type 112b	Ecuación Type 65a Type 65d (sin file) Type 25d Type 1502 Type 1503 Type 997
 Type 517	Schedule que permite establecer rutinas en las diversas franjas horarias para cada día.	Type 14h	Ecuación Type 56
 Type 1502	Termostato para calentar	Type 56	Type 65d Ecuación Type 56 Type 997
 Type 1503	Termostato para enfriar	Type 56	Type 65d Ecuación Type 997
 Type 14h	Permite asignar valores a lo largo del tiempo de simulación. Muy útil para vincular con otros types mediante el generador de ecuaciones.		Ecuación Type 56
 Type 25d	Impresión de la evolución durante el tiempo de simulación de los parámetros marcados. Da un archivo txt.	Varios (todos aquellos parámetros que deseemos)	
 Type 65a	Impresión de la evolución durante el tiempo de simulación de los parámetros marcados. Da un archivo txt y permite visualizar la evolución.	Varios (todos aquellos parámetros que deseemos)	
 Type 65d	Impresión de la evolución durante el tiempo de simulación de los parámetros marcados. Permite visualizar la evolución.	Varios (todos aquellos parámetros que deseemos)	
 Type 77	Permite conocer la temperatura del suelo a la profundidad deseada.		Type 56 Type 997
 Type 997	Ventilador para provocar el movimiento del aire que circula por los tubos del EAHE.	Type 997 Type 1502	Type 56 Type 25d

Type 112b		Type 1503 Ecuación	Type 65a
 Type 997	EAHE. Permite dar el número y longitud de tubos y profundidad deseada. Aporta un caudal de aire recirculado al invernadero. Se sitúa el ventilador en la impulsión.	Type 997 Ecuaciones Type 77 Type 33e Weather data Type 1502 Type 1503	Ecuaciones Type 112b Type 25d Type 65a Type 65d
 Type 33e	Permite conocer la densidad del aire a partir de su temperatura, presión y humedad relativa.	Type 997	Type 56

A continuación se muestra una tabla con las características básicas de las simulaciones realizadas. Para obtener información más detallada, tal como el tipo y modelo de ventilador utilizado, con las curvas y punto de operación, o los resultados de cada una de las simulaciones, deberá verse el Anexo 4.

Tabla 10. Modelos de simulaciones a realizar.

Modelo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Diámetro (m)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
Longitud tubos (m)	23	38	23	38	23	23	23	23	23
Nº tubos	38	23	38	23	15	4	8	8	8
Nº ventiladores	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Caudal máscico total (kg/h)	37500	22500	7500	5000	60000	25000	50000	40000	30000
Velocidad (m/s)	5	5	1	1	3	5	5	4	3
Caída de presión (Pa)	481	424	24,1	20,0	150	41,3	121	78,7	45,2

4.4 Análisis de los diversos modelos

En primer lugar, debemos destacar que en todos los casos, la aportación de frío que hace el equipo en verano es muy pobre, y no merece la pena alargar hasta finales de junio, dado que el equipo no aporta suficiente frío y sería muy costoso dimensionar uno que nos permitiese alargar tan solo un mes la producción. Además, debemos tener en cuenta que durante el verano se puede realizar la producción a cielo abierto, que es mucho más económica.

En lo que respecta a la aportación de calor, nos podemos centrar en los valores hasta finales de mayo (5640-12384), dado que a partir de este mes no hay demanda. Para comparar las diversas opciones las mostramos en la siguiente tabla.

Tabla 11. Tabla con comparativa de los resultados previos a la instalación del EAHE y con los 9 Modelos. Datos hasta finales de Mayo (5640-12384).

	Sin EAHE	MOD 1	MOD 2	MOD 3	MOD 4	MOD 5	MOD 6	MOD 7	MOD 8	MOD 9
Horas T>26º	368	368	368	367	367	368	367	367	367	367
Horas T> 28º	171	167	165	165	168	169	171	169	170	169
Horas T> 30º	86	76	72	78	82	83	86	85	86	85
Horas T< 12º	777	572	632	745	753	660	768	754	754	756
Horas T< 11º	408	67	117	237	258	141	338	252	272	292
Horas T< 10º	196	9	19	77	89	34	149	90	103	107
Horas T< 9º	70	0	0	16	21	1	46	23	29	33
Horas T< 8º	24	0	0	0	0	0	8	0	0	3
Horas RH>80	2921	3057	3063	3062	3058	3038	3010	3034	3040	3042
Horas RH<40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Destacamos que las diferencia que obtenemos respecto al invernadero sin equipo cuando las temperaturas pasan de 30°C son muy bajas, teniendo en el mejor de los casos un descenso de 10 horas (un 11.62%). Debido al coste energético que tiene arrancar la instalación, no merece la pena realizar esta operación.

En cuanto al aporte de calor realizado para evitar bajar de los 8°C, podemos ver en verde las disposiciones válidas (la 1, 2, 3, 4, 5, 7 y 8). Pese a que todas cumplen el objetivo de mínimos que nos marcamos, algunas consiguen un mayor calentamiento del invernadero. Pero esta información que mostramos aquí es insuficiente. Debemos tener en cuenta también el consumo energético de los ventiladores, el cual se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 12. Tabla con los valores de aportación de calor y frío y rendimientos de cada modelo.

	MOD1	MOD2	MOD3	MOD4	MOD5	MOD6	MOD7	MOD8	MOD9
horas cold	172	172	172	172	172	172	172	174	173
Cons cold (kJ)	6,44E+06	2,72E+06	2,11E+05	1,98E+05	5,20E+06	6,84E+05	2,72E+06	1,50E+06	1,25E+06
Cold (kJ)	9,22E+06	8,54E+06	5,03E+06	4,39E+06	5,50E+06	1,60E+06	3,18E+06	3,16E+06	2,96E+06
COPcold	1,432	3,135	23,901	22,145	1,057	2,338	1,168	2,101	2,380
horas heat	429	458	479	482	465	498	481	488	489
Cons heat (kJ)	1,61E+07	7,25E+06	5,86E+05	5,55E+05	1,41E+07	1,98E+06	7,62E+06	4,22E+06	3,52E+06
Heat (kJ)	1,19E+07	1,29E+07	9,09E+06	8,07E+06	8,51E+06	3,32E+06	5,95E+06	5,95E+06	5,78E+06
COPheat	0,742	1,773	15,499	14,526	0,605	1,677	0,781	1,412	1,640

En la tabla mostramos el calor y frío aportado por cada modelo. Marcamos en rojo los modelos 6 y 9 dado que no pueden ser tenidos en cuenta la no llegar a los requerimientos mínimos.

Nos fijamos en tres parámetros básicos, el consumo de energía por el ventilador, el calor aportado y ratio de estos dos valores (COP). Añadir que los COPs reales serían mayores a los que aparecen en las tablas debido a que se han realizado simulaciones con un time-step de 1 hora, cuando en muchas franjas los equipos no trabajan durante este tiempo completo. Para realizar el cálculo del consumo eléctrico de estos equipos Trnsys asume que el consumo es igual al producto del número de horas en las cuales el ventilador ha estado encendido por su potencia nominal, asumiendo siempre que se trabaja la hora completa. Pese a ello,

consideramos esta aproximación cercana a los valores reales y se realiza un redondeo pesimista para evitar sobrevalorar el rendimiento de la instalación. Añadir que realizar los cálculos con un time-step más pequeño no aporta mucha más información y hubiese imposibilitado la opción de realizar un número tan elevado de simulaciones.

Destacamos el modelo 3, el que menos consume y de los que da una mayor aportación de calor, teniendo el mejor COP (15.5). Sin ser tan eficiente (1.41), destacamos también el modelo 8, dado que al estar formado solo por 8 tubos, pese a que el coste energético de hacerlo funcionar pueda ser superior, es más barato de fabricar. Pese a ello, consideramos que la opción 8 seguiría sin ser viable debido a que las bombas de calor de calor aportan COPs de ente 3 y 5, y su coste es mucho más reducido al que pueda tener la instalación del EAHE, independientemente del número o tamaño de tubos.

Por todo ello, se selecciona el modelo 3 como el de mayor viabilidad, por tanto se presupuestará para realizar un estudio económico y comparar la amortización del equipo enfrentado a algunos métodos clásicos de aporte de calor, como bien pueden ser una caldera o una bomba de calor.

Para poder realizar tal comparación, debemos tener en cuenta los siguientes parámetros de la instalación del EAHE seleccionada:

Tabla 13. Propiedades del modelo escogido.

Parámetro	EAHE Modelo 3
Horas aportando calor (h)	479
Potencia instalada (kW)	0.34
Consumo eléctrico (kWh (y kJ))	162.86 (5,86E+05)
Calor aportado (kJ)	9,09E+06
COP heat (kJ/kJ)	15,499
Potencia media (kW)	5.28
Potencia máxima requerida (kW)	11.17

5 Estudio con sistema de climatización alternativo

Para poder comparar la eficiencia del equipo seleccionado en el apartado anterior, se debe comprobar el rendimiento de un equipo de características similares que podamos encontrar en el mercado.

Decidimos compararlo con un sistema de bomba de calor solo para calefacción, uno de los sistemas de climatización más utilizados en la actualidad debido a su alta eficiencia y a su bajo coste. Para la simulación solo haremos trabajar al equipo generado comprobando su eficiencia en invierno, comprobando que no bajemos de 8°C y visualizando las temperaturas obtenidas.

El equipo se conecta en las mismas condiciones que el EAHE, con el mismo sistema de control de temperatura y realizando la simulación hasta finales de mayo.

Partiendo de la tabla 13 del apartado 4.4 buscamos un equipo con una potencia máxima superior a 11.17 kW en las condiciones más desfavorables.

Seleccionamos el equipo PUHZ-SW 120YHA de Mitsubishi [40].

UNIDAD EXTERIOR				PUHZ-SW120YHA/ YHA
UNIDAD INTERIOR (HYDROBOX)				EHSC-VM2C
Capacidad	Nominal	W:35°C; A: 7 / 2 / -7°C	[kW]	16,00 / 12,00 / 11,20
	Máxima	W:35°C; A: 7 / 2 / -7°C	[kW]	17,28 / 13,42 / 12,37
Caudal nominal del circuito de calefacción			[L/min]	45,9
COP	Nominal	W:35°C; A: 7 / 2 / -7°C		4,10 / 3,24 / 2,85
Eficiencia estacional	Baja Tª (W:35°C)	η _{S,MED} (Rango) / η _{S,CAL}	[%]	162% (A++) / 222%
	Media Tª (W:55°C)	η _{S,MED} (Rango) / η _{S,CAL}	[%]	125% (A++) / 157%
Rangos de Tª	Aire exterior	Calefacción	min / máx	[°C] -20 / +21
		ACS	min / máx	[°C] -20 / +35
	Circuito de calefacción	Impulsión	máx	[°C] +60
		Retorno	min / máx	[°C] +10 / +50
Conexión	Ø tuberías	Líquido - Gas	[pu]	3/8 - 5/8
Ext-Int	Longitud máxima	Vertical / Total	[m]	30 / 75
Alimentación eléctrica				1 Fase / 230V / 50Hz 3 Fases / 400V / 50Hz
Resistencia de apoyo (alimentación independiente)				Monofásica 2kW Monofásica 2kW
PVR	Unidad exterior			4.190 € 4.560 €
	Unidad interior			2.630 €
	Conjunto			6.820 € 7.190 €

Figura 43. Equipo de bomba de calor seleccionado [40].

Para comparar los resultados, realizamos una simulación con una aportación de calor de 11.2 kW, superior a la máxima requerida y valor igual a la mínima que nos asegura el equipo seleccionado.

A continuación mostramos una tabla con los resultados obtenidos con la bomba de calor y comparado con el Modelo 3 del EAHE (el escogido) y la simulación previa a instalar los equipos. La comparación la hacemos directamente de la hora 5640 a la 12384, dado que al no hacer funcionar el equipo para producción de frío, no obtendremos diferencias en el mes de julio.

Tabla 14. Comparativa de temperaturas y HR sin equipos, con el Modelo 3 de EAHE y sin equipos (5640-12384).

	Heat Pump	MOD 3	Sin equipos
Horas T> 28º	171	165	171
Horas T> 30º	86	78	86
Horas T< 12º	759	745	777
Horas T< 11º	109	237	408
Horas T< 10º	33	77	196
Horas T< 9º	3	16	70
Horas T< 8º	0	0	24
Horas RH>80	2752	3062	2921
Horas RH<40	0	0	0

Para calcular el COP del equipo, pese a que los valores nominales que nos da el fabricante le correspondería un COP de 4.5, lo comprobaremos con el mismo procedimiento que para el EAHE, el cual conlleva un ligero error que lo minimiza al contar todas las horas de funcionamiento como horas completas de trabajo. Para acabar compararemos el resto de parámetros que obtuvimos del EAHE.

Tabla 15. Comparativa de las propiedades del EAHE y de una bomba de calor.

Parámetro	EAHE Modelo 3	Heat Pump
Horas aportando calor (h)	479	443
Potencia instalada (kW)	0.34	4
Consumo eléctrico (kWh y (kJ))	162.86 (5,86E+05)	1772.2 (6,38E+06)
Calor aportado (kJ)	9,09E+06	1,47E+07
COP heat (kJ/kJ)	15,499	2,3
Potencia media (kW)	5.28	9.19
Potencia máxima requerida (kW)	11.17	11.2

Destacamos que las horas de aportación de calor se ven reducidas dado que siempre puede aportar la potencia máxima asignada, de 11.2kW, calentando más rápido, mientras que la del EAHE varía en función del ΔT . Sin embargo el consumo energético para asegurar la temperatura de 8°C es 11 veces menor utilizando un EAHE debido a la alta eficiencia energética del sistema.

Destacar que ambos COPs están minorados debido a que el programa se ejecuta con un time-step de una hora, contando consumos durante franjas de tiempo en los que los equipos están parados. Añadir para la bomba de calor que la diferencia entre rendimientos en el caso real no es tan grande, porque estamos obligando a trabajar a la bomba de calor en su situación más desfavorable, dándonos un COP de 2.3, cuando el fabricante dice que estos variarán, en función de las condiciones climáticas entre 4.10 y 2.85.

Pese a estos inconvenientes que sufre la bomba de calor a la hora de realizar la simulación, su COP sigue muy lejos de los valores conseguidos por el EAHE.

6 Modelos con placas de PCM

En el siguiente apartado se comentan los diversos modelos considerados con placas de PCM, analizando su rendimiento y probando con un mayor número de placas.

Para poder ver este análisis con mayor detalle, dirijase al Anexo 3.

A continuación mostramos de forma muy simplificada el funcionamiento de los modelos a desarrollar.

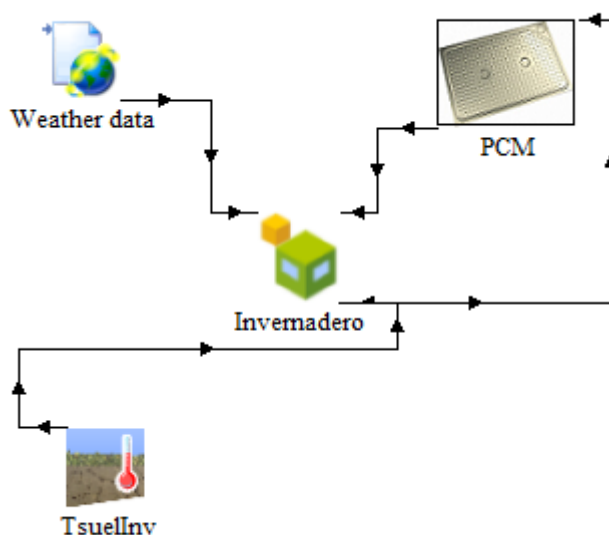


Figura 44. Esquema básico de funcionamiento y gestión de la información de los diferentes modelos con placas de PCM.

Mediante este esquema básico podemos ver como las placas de PCM cogen información del invernadero para calcular el aporte de calor. Las placas, a partir de esta información y de sus parámetros básicos generan un input con la carga de calor generada en el invernadero. Además debemos destacar que el invernadero además información externa con las condiciones ambientales, las cual es tratada mediante otros types para ceñirnos a las condiciones reales de los modelos a diseñar.

6.1 Distribución placas de PCM

En primer lugar, para considerar la distribución de las placas de PCM debemos tener en cuenta la distribución del cultivo y el tamaño de las placas de PCM de RubiTherm (450mm de ancho, 300mm de alto y 15mm de espesor).

Se colocaran las placas de PCM entre las líneas de cultivo. Colocamos 11 líneas de placas de PCM entre el cultivo, con una longitud de 38m. En la siguiente imagen se puede ver como se distribuyen las líneas de placas de PCM (en línea discontinua).

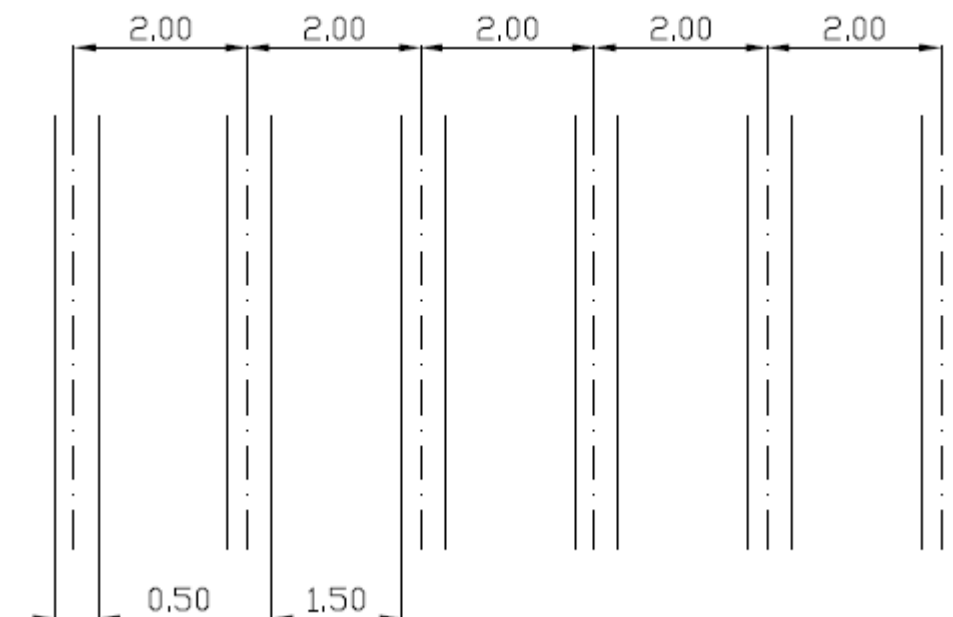


Figura 45. Distribución placas de PCM.

Decidimos colocar 50 placas de PCM a lo largo de cada hilera, teniendo placas cada 75cm con una separación de 30cm entre ellas, obteniendo un total de 550 placas. Esta configuración nos permite tener una distancia suficiente entre placas para realizar labores de mantenimiento y a la vez un alto número de placas cercanas a las plantas para conseguir transmitir rápidamente a estas el calor desprendido. También debemos destacar la importancia de que no colocar placas verticalmente, dado que facilitaríamos la incidencia directa de la luz solar sobre estas, variando el modo real de funcionamiento de la placa.

Se realizarán pruebas con diversos tipos de placas de catálogo.

Estas placas tienen un PVP de 10€ por unidad, sin embargo, para un pedido como el que nosotros realizaríamos, podemos suponer un descenso del precio de estas de hasta un 50%.

Destacar que deberemos considerar las características de los PCM para aportar estos valores al type creado, a partir del cual realizaremos la simulación (type 189). Para ello se aportará una figura donde aparezca toda la información que proporciona el fabricante, y que posteriormente Trnsys nos requerirá.

Debe tenerse en cuenta que el análisis que realiza Trnsys considera todo el invernadero un solo nodo, por lo que la temperatura que dé será temperatura global, mientras que las plantas, que están a escasos 25cm de las placas, pueden tener una temperatura ligeramente superior a la que Trnsys, por tanto hacemos el estudio con cálculos pesimistas respecto a la situación real.

6.2 Estudio con los diversos tipos de placas considerados

Para realizar este estudio, ha sido necesario crear el siguiente archivo de Trnsys con la estructura de types que se muestra a continuación.

Añadir que ha sido necesario crear, con la colaboración de la Universitat de Lleida, un type donde pudiésemos modelar el comportamiento de los PCM, el denominado type 189.

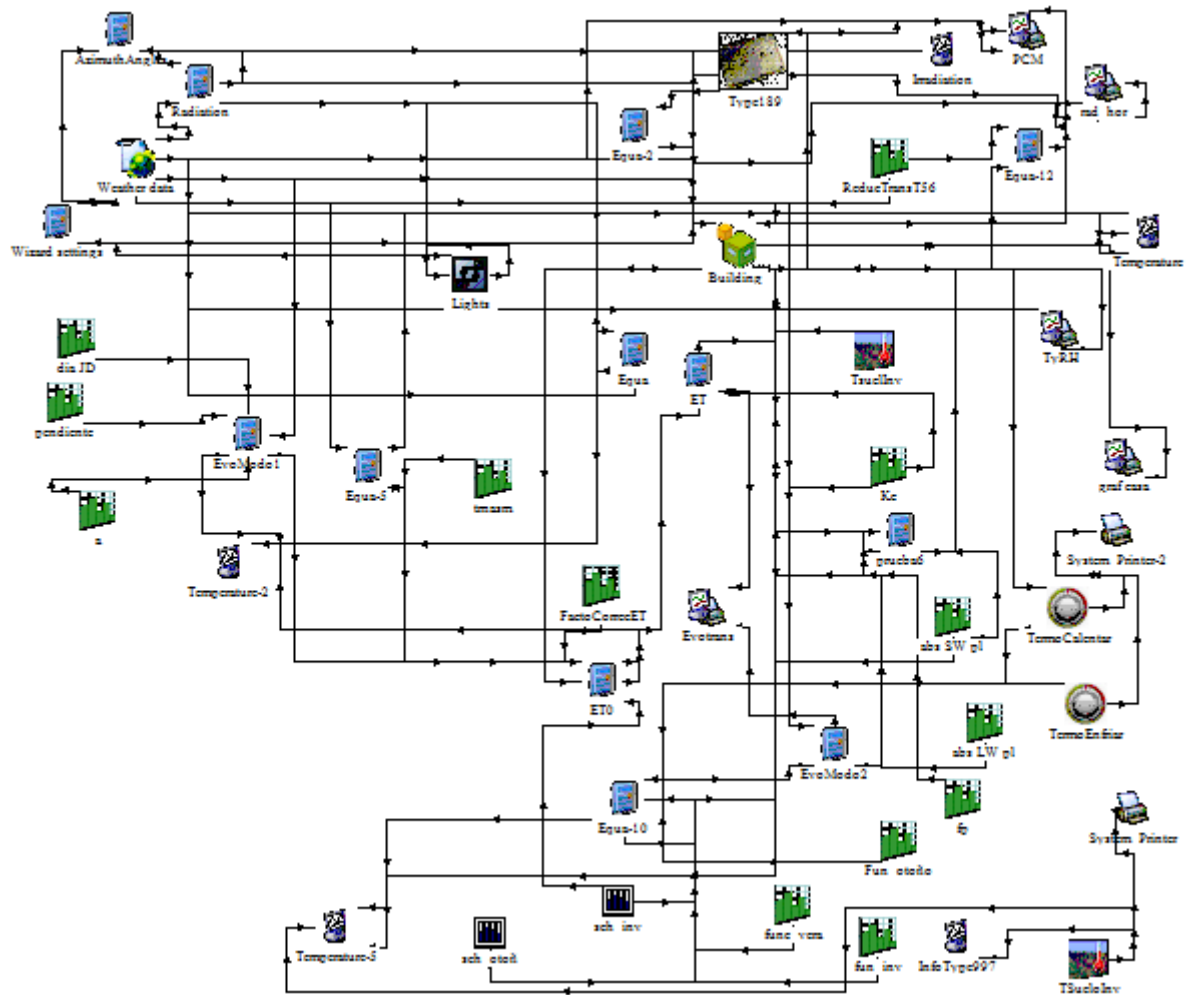














Figura 46. Disposición de los diversos types para la simulación del modelo del invernadero con el Type 189.

En la que se han utilizado los siguientes Types que mostramos en la tabla:

Tabla 16. Types utilizados en el "modelo invernadero".

Type	Función	Recibe de	Envía a
 Ecuación	Permite realizar ecuaciones con parámetros de otros types. Es un type completamente abierto donde se pueden poner entradas y salidas al gusto.	Interacción abierta	Interacción abierta
 Weather data	Archivo que carga los datos climáticos de la ubicación deseada		Type 56
 Type 56	Es la "casa", en nuestro caso el invernadero. A este Type se le dan todas las propiedades que definan el edificio a simular y se vincula con el resto de types que aporten calor o puedan realizar cualquier tipo de interacción sobre el invernadero.	Weather data Type 77 Type 14 h Ecuación Type 517	Ecuación Type 65a Type 65d (sin file) Type 25d Type 1502 Type 1503 Type 189
 Type 517	Schedule que permite establecer rutinas en las diversas franjas horarias para cada día.	Type 14h	Ecuación Type 56
 Type 1502	Termostato para calentar	Type 56	Type 65d Ecuación Type 56
 Type 1503	Termostato para enfriar	Type 56	Type 65d Ecuación
 Type 14h	Permite asignar valores a lo largo del tiempo de simulación. Muy útil para vincular con otros types mediante el generador de ecuaciones		Ecuación Type 56
 Type 25d	Impresión de la evolución durante el tiempo de simulación de los parámetros marcados. Da un archivo txt.	Varios (todos aquellos parámetros que deseemos)	
 Type 65a	Impresión de la evolución durante el tiempo de simulación de los parámetros marcados. Da un archivo txt y permite visualizar la evolución.	Varios (todos aquellos parámetros que deseemos)	

 Type 65d	Impresión de la evolución durante el tiempo de simulación de los parámetros marcados. Permite visualizar la evolución.	Varios (todos aquellos parámetros que deseemos)	
 Type 77	Permite conocer la temperatura del suelo a la profundidad deseada.		Type 56
 Type 189	Permite modelar el comportamiento de una placa de PCM a partir de la temperatura ambiente y las propiedades de este.	Type 56	Ecuación Type 56

Estos tipos se pueden encontrar explicados con mayor detalle en el Anexo 4.

6.2.1 Modelo 1. PCM de 18°C

En primer lugar probamos un PCM de 18°C, el cual tiene una mayor capacidad de almacenamiento de valor 260kJ/kg.

Para poder analizar la situación que nos interesa, que son los días donde podemos tener temperaturas inferiores a los 8°C, graficamos los días 13, 14 y 15 de Enero, donde podremos observar la evolución de las temperaturas y del calor aportado con mayor detalle.

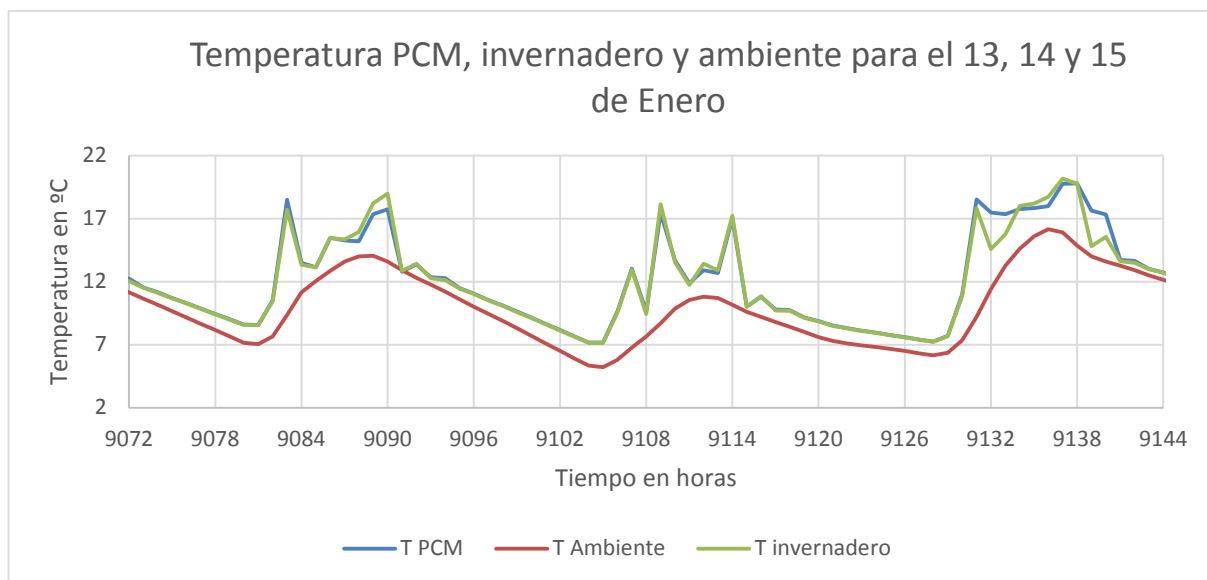


Figura 47. Perfil de temperaturas entre las horas 9072-9144 con placas de PCM de 18°C.

En primer lugar, respecto a las temperaturas, podemos observar como hay días, que al no superar los 18°C, el PCM no cambiará de fase. Eso se traduce en una baja aportación de calor. En este gráfico de temperaturas podemos ver la diferencia entre la Temperatura del PCM y la del invernadero. Para el día 14 de Enero, podemos ver como ambas temperaturas son prácticamente idénticas.

En cambio para el día 15 de Enero, al llegar a 20°C, si tenemos cambio de fase, lo que provocará una mayor aportación de calor del PCM.

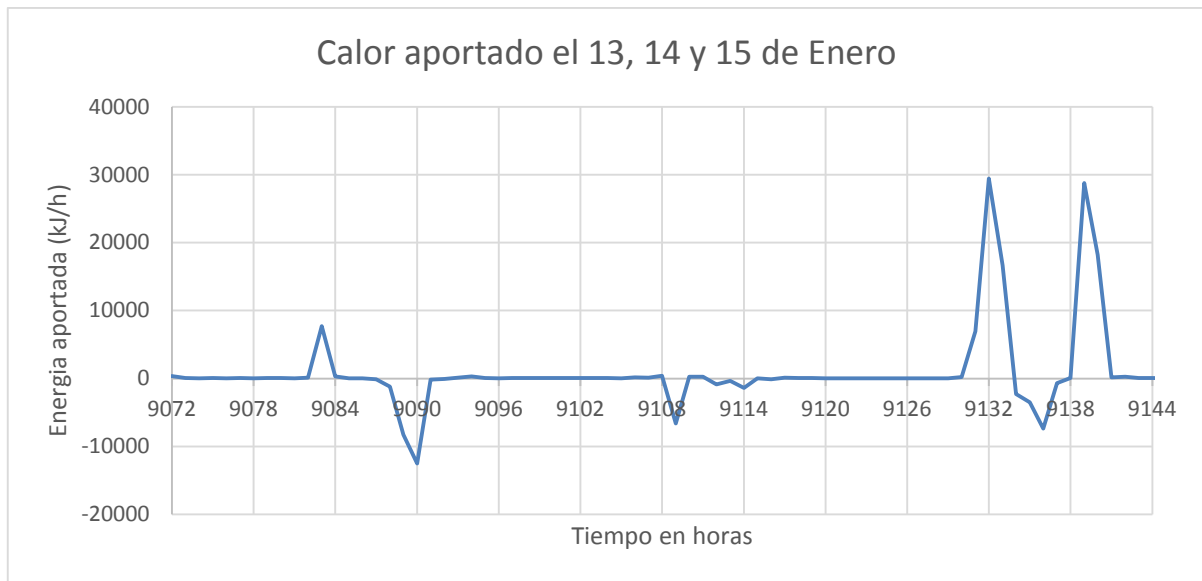


Figura 48. Calor aportado por las placas de PCM de 18°C entre las horas 9072-9144.

En este segundo gráfico podemos ver el calor aportado. Se comprueba cómo durante el 14 de Enero la aportación es muy pobre. Pese a no llegar a los 18°C tenemos una leve aportación, debido al rango de temperaturas del PCM, donde se produce parte del cambio de fase se produce antes, debido a que los PCM están formados por diversos compuestos, y no todos realizan el cambio de fase a la misma temperatura (en este caso ya hay cambio de fase a 17°C). Sin embargo, su mayor rendimiento lo dan pasada la temperatura nominal, en este caso, 18°C.

Los picos que aparecen para el día 15 de Enero coinciden con las horas en las que la temperatura del PCM es superior a la del invernadero, dado a que se ha llegado a haber cambio de fase.

6.2.2 Modelo 2. PCM de 11°C

En este caso escogemos un PCM con una temperatura de cambio de fase que siempre se vaya a dar, 11°C. Este PCM tiene una capacidad de almacenamiento de calor de 200kJ/kg.

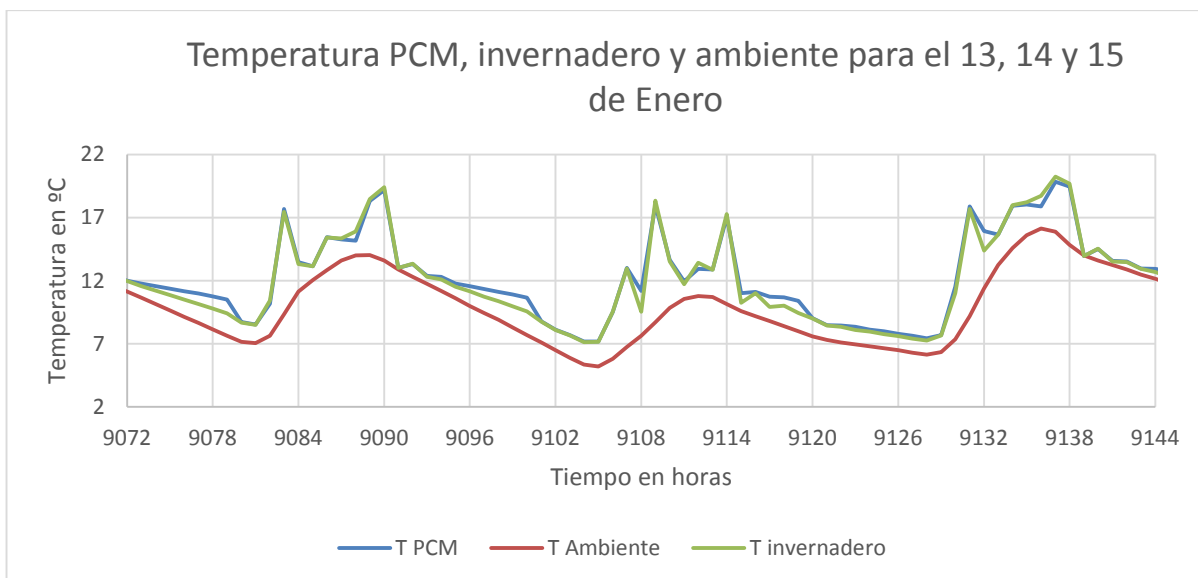


Figura 49. Perfil de temperaturas entre las horas 9072-9144 con placas de PCM de 11°C.

En este caso podemos ver como durante estos tres días la temperatura del PCM ha llegado a ser superior a la del invernadero debido a que el PCM ha tenido cambio fase. Además podemos comprobar como la temperatura del invernadero siempre ha sobrepasado los 11°C. Sin embargo, tras realizar la aportación de calor, las placas de PCM se enfrían y finalmente su temperatura es igual a la del invernadero, llegando a bajar de los 8°C. Consideramos que esto es debido a que el cambio de fase todavía está alejado de la temperatura que queremos mantener, y tras realizar la aportación de calor, el invernadero, con una alta tasa de infiltración y con paredes muy finas, es incapaz de guardar este calor aportado. Por ello se estudiará la opción de poner PCM que tenga el cambio de fase a la temperatura que deseamos mantener, pese a que tengan una capacidad de almacenamiento de calor inferior.

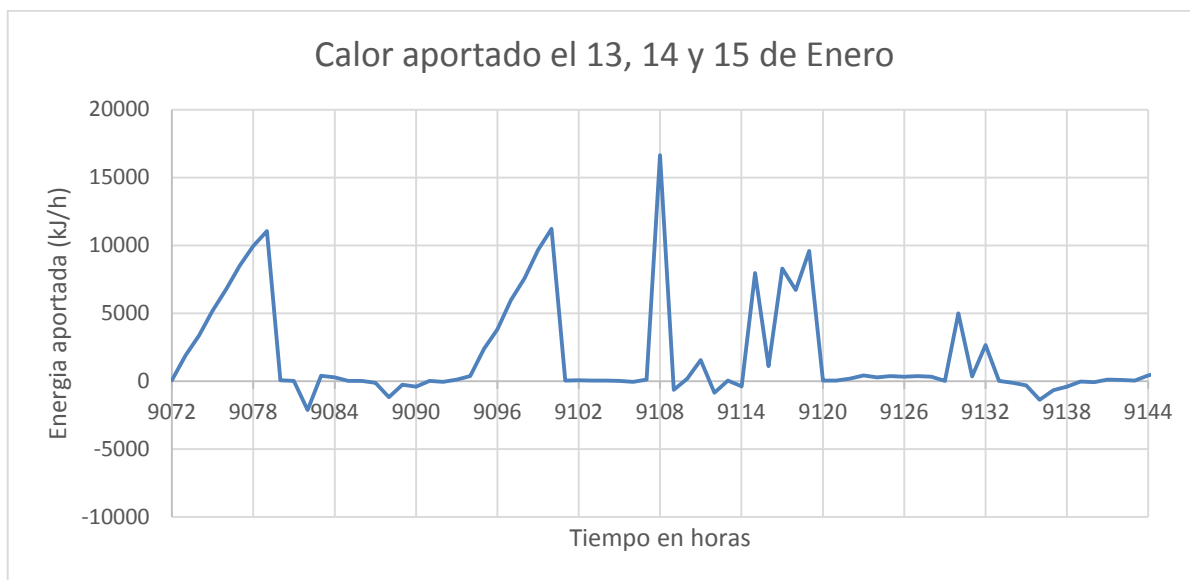


Figura 50. Calor aportado por las placas de PCM de 11°C entre las horas 9072-9144.

Mediante esta otra imagen podemos ver cómo, pese a que los picos de calor aportados son menores respecto al PCM de 18°C, todos los días llegamos a tener esta aportación extra de calor por parte del PCM dado que se ha completado el cambio de fase.

6.2.3 Modelo 3. PCM de 9°C.

En este caso escogemos un PCM de 9°C, que con el margen de temperaturas entre las que actúa, podemos considerar que funde desde los 8 hasta los 11°C, incluyendo todo el margen de temperaturas sobre el que deseamos actuar en el invernadero.

Este PCM tiene una capacidad de almacenamiento de calor de 170kJ/kg.

Volvemos a graficar los días 13, 14 y 15 de Enero para analizar detalladamente la eficiencia del PCM en nuestro invernadero para conseguir mantener temperaturas por encima de 8°C.

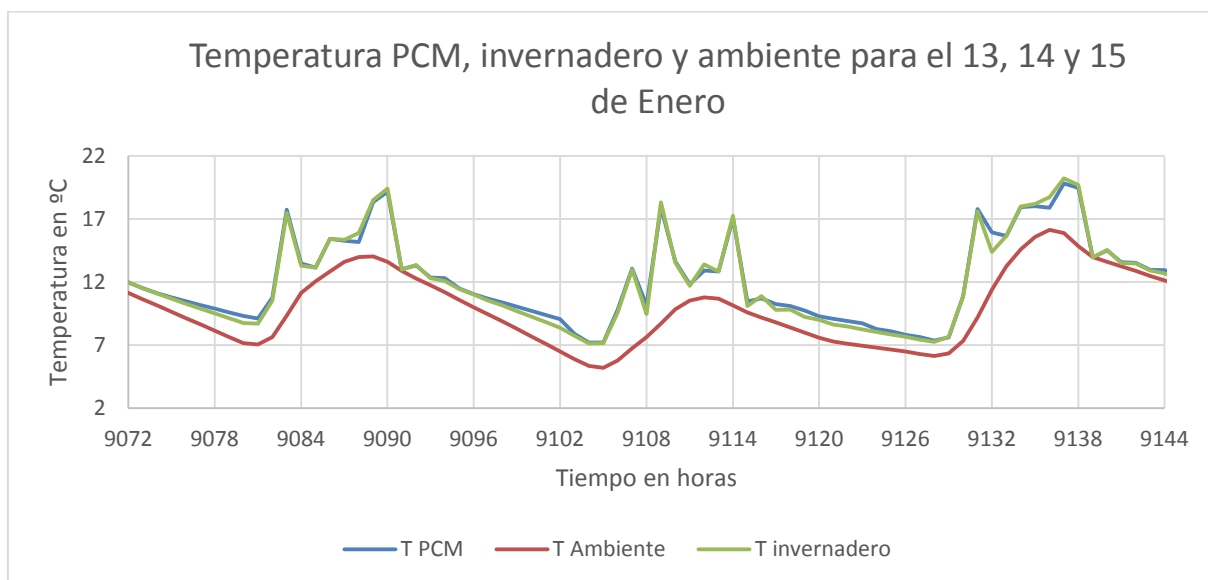


Figura 51. Perfil de temperaturas entre las horas 9072-9144 con placas de PCM de 9°C.

Observamos como la temperatura del PCM, se separa de la del invernadero para ser superior a esta cerca de los mínimos diarios, aportando el calor por tanto durante las horas más frías en los días críticos.

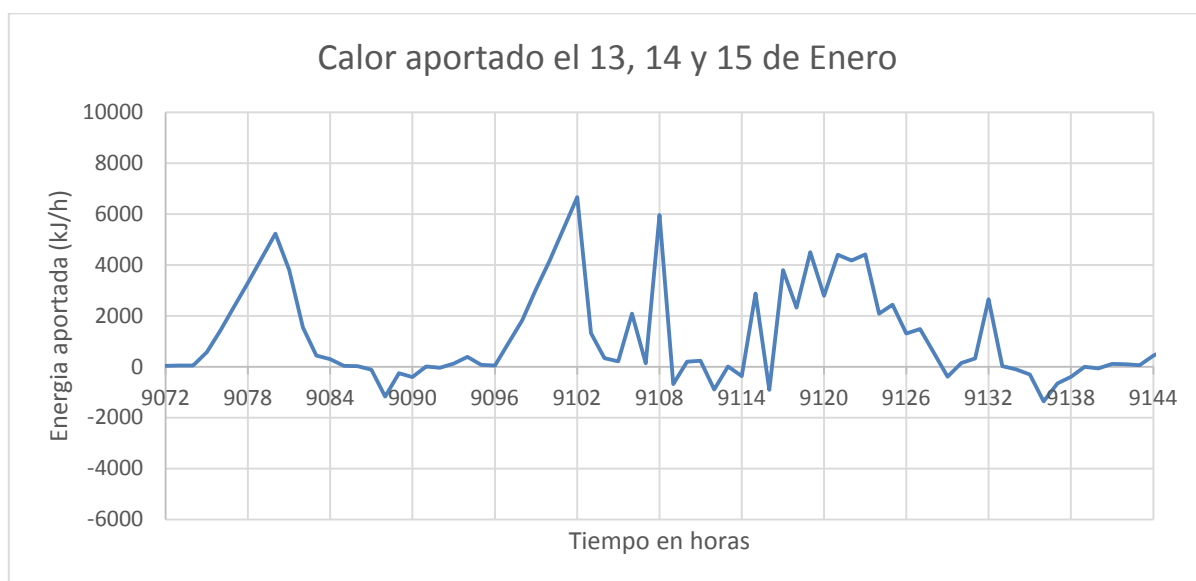


Figura 52. Calor aportado por las placas de PCM de 9°C entre las horas 9072-9144.

Mediante el grafico de energía aportado podemos observar como los picos de calor coinciden con las horas en las que la temperatura del PCM es superior a la del invernadero. Pese a que

la aportación de calor por parte del PCM es menor a la de los casos anteriores, vemos que esta se produce durante los 3 días analizados, y durante las horas de menor temperatura. Sin embargo, la aportación de calor es tan baja, que las diferencias respecto a los casos anteriores para los días observados no son significativas.

6.2.4 Modelo 4. PCM de 8°C.

Realizamos una simulación con un PCM de cambio de fase 8°C, coincidiendo justo con la temperatura de la que no deseamos bajar. Destacar, que este PCM realmente funde entre 7 y 9°C, por lo que parte de su rendimiento está por debajo de los 8°C, por lo que parte de su actuación no nos ayudará a evitar bajar de los 8°C que deseamos mantener para todo el año. En caso de aumentar el número de placas hasta conseguir no bajar nunca de los 8°C, estaríamos perdiendo parte del efecto de estas, siendo no eficiente por tanto la elección de estas.

Este PCM tiene una capacidad de almacenamiento de calor de 190kJ/kg.

Volvemos a mostrar los días 13, 14 y 15 de enero para poder analizar detalladamente la evolución de las temperaturas.

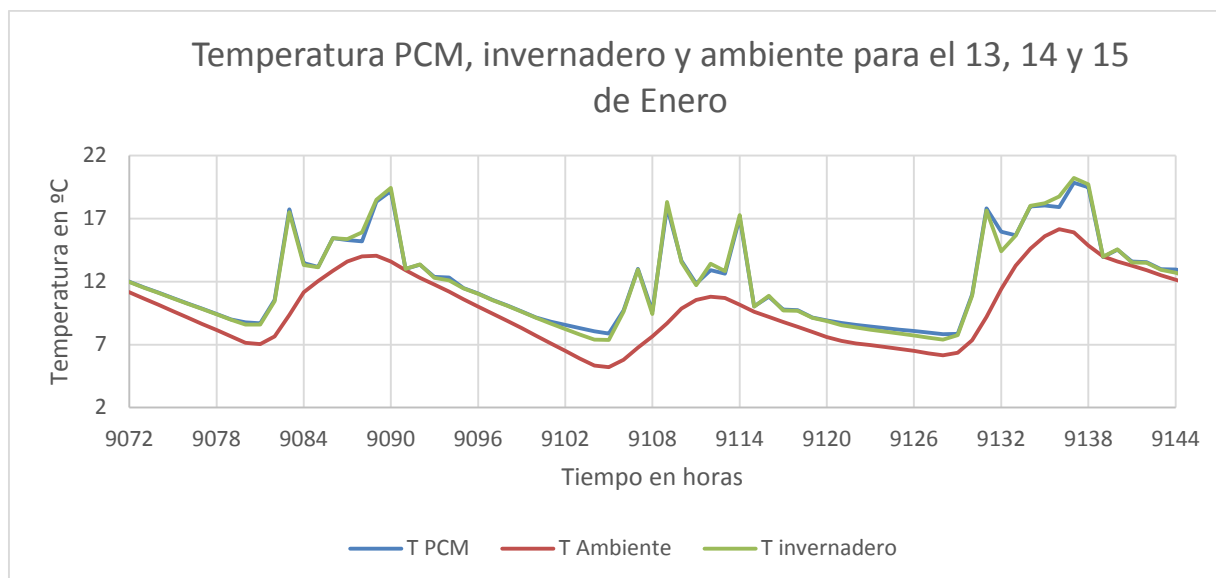


Figura 53. Perfil de temperaturas entre las horas 9072-9144 con placas de PCM de 8°C.

Observamos que al alcanzar las temperaturas mínimas, las placas de PCM tienen una temperatura superior a la del invernadero.

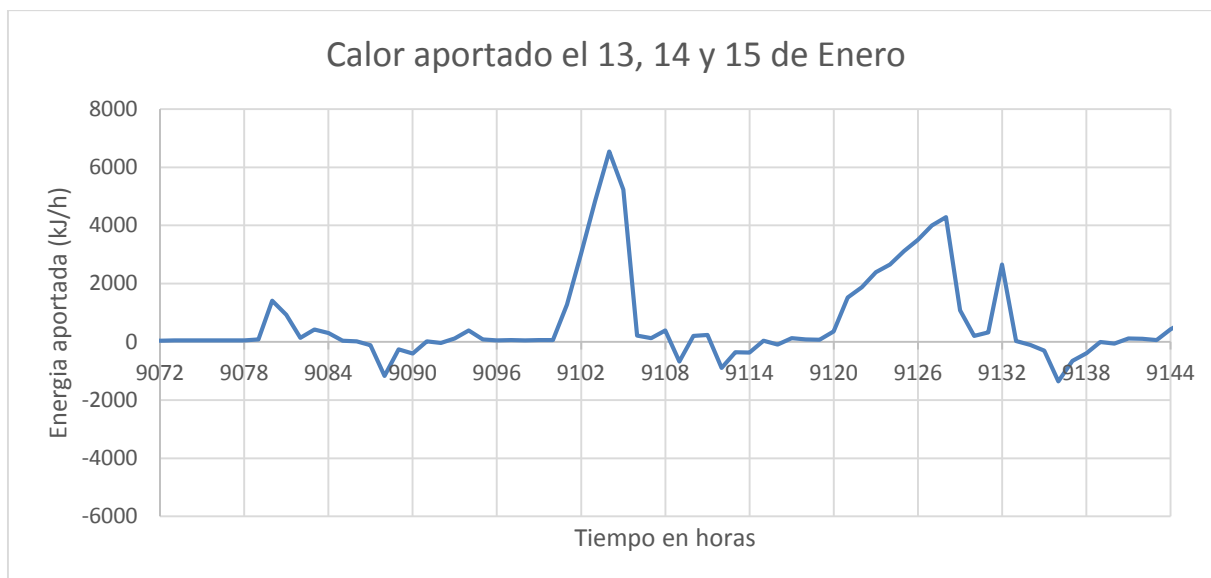


Figura 54. Calor aportado por las placas de PCM de 8°C entre las horas 9072-9144.

Sin embargo hay que destacar que dado que la temperatura de cambio de fase es muy baja, en este caso los días que no llegamos a bajar a temperaturas cercanas a los 8°C, no tenemos ninguna aportación de calor. En el gráfico de arriba podemos ver como en el día 13 de Enero apenas hay aportación de calor, dado que no se llega a las temperaturas de actuación del PCM. Por tanto no sacaríamos partido de la instalación de climatización, actuando esta solo para los casos más extremos.

6.3 Análisis de los diversos modelos

A continuación nos disponemos a comparar el calor desprendido por cada tipo de placas debido a las condiciones climáticas de nuestro invernadero y a las temperaturas conseguidas. Al igual que en el análisis con el EAHE, centraremos el estudio hasta el 31 de mayo (hora 12384).

Realizaremos este análisis comparativo para encontrar la disposición más interesante para nuestros condicionantes climáticos.

Tabla 17. Calor absorbido / desprendido por las placas de PCM. Unidades en kJ.

Modelo	1 (PCM 18°C)	2 (PCM 11°C)	3 (PCM 9°C)	4 (PCM 8°C)
calor desprendido (kJ)	6.80E+06	1.85E+06	1.19E+06	9.89E+05
calor absorbido (kJ)	-6.80E+06	-1.85E+06	-1.19E+06	-9.91E+05

Tabla 18. Comparativa de temperaturas de las diversas placas de PCM probadas.

Modelo	Sin PCM	1 (PCM 18°C)	2 (PCM 11°C)	3 (PCM 9°C)	4 (PCM 8°C)
Horas T > 26°	368	367	366	366	366
Horas T > 28°	171	171	171	171	171
Horas T > 30°	86	86	86	86	86
Horas T < 12°	777	770	775	773	774
Horas T < 11°	408	400	368	401	403
Horas T < 10°	196	196	147	187	196
Horas T < 9°	70	70	56	57	70
Horas T < 8°	24	24	22	16	17
Horas RH > 80	2921	2856	2876	2904	2909
Horas RH < 40	0	0	0	0	0

Observamos que el modelo que nos aporta más calor es el de las placas de 18°C, dado que son las que tienen mayor capacidad de almacenamiento de calor, y la temperatura de 18°C aparece en un mayor número de días, pese a que en muchos de estos no se llegue a bajar de los 12°C, no siendo necesaria aportación de calor. Sin embargo el modelo que nos aporta una mayor reducción en el número de horas por debajo de 8°C es el modelo 3, realizado con placas de PCM de 9°C.

7 Modelo con placas PCM y bomba de calor

Tras observar que tan solo con placas de PCM no se puede asegurar la temperatura de 8°C para toda la temporada, realizamos un modelo donde las placas actúen junto con una bomba de calor, de forma que se intente reducir el consumo de esta. Nos centramos en las fechas de simulación hasta el 31 de Mayo (5640-12384). Este modelo de Trnsys está basado en el utilizado en el apartado 6.

7.1 Placas PCM de 9°C con bomba de calor

En primer lugar realizamos un modelo basado en el Modelo 3 del apartado 6, utilizando 550 placas de PCM de 9°C. Además, colocamos una bomba de calor que actúe a partir de los 12°C.

A continuación mostramos tablas comparativas de temperaturas, transferencia de calor de los PCM y funcionamiento de la bomba de calor en ambos casos para poder comparar ambos modelos.

Tabla 19. Comparativa de temperaturas y RH con PCM+Bomba de calor, sin PCM y Bomba de calor.

	PCM 9°C + Heat Pump	Sin PCM	Heat Pump
Horas T> 26º	366	368	368
Horas T> 28º	171	171	171
Horas T> 30º	86	86	86
Horas T< 12º	756	777	759
Horas T< 11º	111	408	109
Horas T< 10º	31	196	33
Horas T< 9º	1	70	3
Horas T< 8º	0	24	0
Horas RH>80	2747	2921	2752
Horas RH<40	0	0	0

Tabla 20. Transferencia de calor de los PCM con bomba de calor y solos.

	PCM 9°C + Heat Pump	PCM 9°C
calor desprendido (kJ)	1.08E+06	1.19E+06
calor absorbido (kJ)	-1.08E+06	-1.19E+06

Tabla 21. Funcionamiento de la bomba de calor con los PCM y sola.

	PCM 9°C + Heat Pump	Heat Pump
horas funcionamiento	442	443
Consumo eléctrico (kWh y (kJ))	1766,7 (6,36E+06)	1772,2 (6,38E+06)
calor aportado (kJ)	1.47E+07	1.47E+07
COP	2.31	2.30
COP máximo	2.80	2.80
potencia media (kW)	9,25	9,19

Observamos que con este PCM, no conseguimos reducir las horas de funcionamiento de la bomba de calor, dado que esta entra a actuar a 12°C, antes de que se nos dé el cambio de fase. Por tanto, no parece una buena elección para reducir el consumo energético de la bomba de calor.

7.2 Placas PCM de 11°C con bomba de calor

Realizamos una segunda prueba con un PCM que tiene el cambio de fase en el rango de temperaturas en el que funciona la bomba de calor. De esta forma, esta deberá realizar menos trabajo debido a la aportación de calor de los PCM.

Tabla 22. Comparativa de temperaturas y RH con PCM+Bomba de calor, PCM y Bomba de calor.

	PCM 11°C + Heat Pump	Sin PCM	Heat Pump
Horas T > 26º	366	368	368
Horas T > 28º	171	171	171
Horas T > 30º	86	86	86
Horas T < 12º	760	777	759
Horas T < 11º	96	408	109
Horas T < 10º	22	196	33
Horas T < 9º	2	70	3
Horas T < 8º	0	24	0
Horas RH > 80	2745	2921	2752
Horas RH < 40	0	0	0

Tabla 23. Transferencia de calor de los PCM con bomba de calor y solos.

	PCM 11°C+Heat Pump	PCM 11
calor desprendido (kJ)	1.88E+06	1.96E+06
calor absorbido (kJ)	-1.88E+06	-1.97E+06

Tabla 24. Funcionamiento de la bomba de calor con los PCM y sola.

	PCM 11°C + Heat Pump	Heat Pump
horas funcionamiento	425	443
Consumo eléctrico (kWh y (kJ))	1700 (6.12E+06)	1772,2 (6,38E+06)
calor aportado (kJ)	1.46E+07	1.47E+07
COP	2.38	2.30
COP máximo	2.80	2.80
potencia media (kW)	9,53	9,19

En este caso observamos un descenso en el número de hora en funcionamiento de la bomba de calor del 4% (18 horas), por lo que no parece un descenso significativo para instalar los PCM para complementar el funcionamiento de la bomba de calor, dado que la reducción de horas parece insuficiente como para amortizar la inversión.

8 Análisis emisiones de CO₂

Se procede a realizar un cálculo de las emisiones de CO₂ anuales y durante la vida útil de cada uno de los equipos a instalar. Para conocer las emisiones de CO₂ nos basamos en el documento del IDEA "Factores de emisión de CO₂ y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector edificios en España" [42], en el cual encontramos la media nacional de emisiones de CO₂ según el documento "La energía en España" y el "CNE".

En las siguientes tablas se muestran los valores hasta el año 2012.

Tabla 25. Valores de emisiones de CO₂ publicados en el documento La Energía en España [42].

Año	Media nacional de emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /kWh)
2005	Sin datos
2006	0.44
2007	0.45
2008	No publicado
2009	0.36
2010	0.28
2011	0.33
2012	0.37
2013	Documento no publicado

Tabla 26. Valores de emisiones de CO₂ publicados por la CNE [42].

Año	Media nacional de emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /kWh)
2005	Sin datos
2006	Sin datos
2007	0.40
2008	0.39
2009	0.27
2010	0.24
2011	0.29
2012	0.33
2013	Sin datos

Se puede ver que hasta el año 2010 las emisiones de CO₂ fueron descendiendo. A partir de aquí tenemos un repunte de estas. Asumimos que esto es debido al inicio de la crisis económica, que afectó a las subvenciones e inversiones en energías renovables, aumentando la quema de fuel, carbón y gas.

Para nuestro estudio utilizaremos un valor de 0.30, realizando una estimación de 2010 a 2013 de los dos documentos mostrados.

Calcularemos las emisiones de CO₂ para cada sistema de climatización propuesto y las compararemos con las emisiones del sistema de bomba de calor.

Tabla 27. Emisiones de CO₂ para cada uno de los sistemas de climatización.

	Bomba de calor	EAHE	PCM	PCM + Bomba de calor
Horas funcionamiento anual	443	479	-	425
Potencia absorbida (kW)	4	0.34	0	4
Consumo energético anual (kWh)	1772	162.86	0	1700
kgCO₂/kWh	0.30	0.30	0.30	0.30
kgCO₂ anual	531.6	48.858	0	510
kgCO₂ a 30 años	15948	1465.74	0	15300

Con los nuevos métodos, al reducir los consumos energéticos conseguimos descender en la misma proporción las emisiones de CO₂ en la misma proporción.

Destacar que los PCM no tienen ninguna emisión en su lugar de aplicación, pero estos no son suficiente para mantener la temperatura, por lo que deben instalarse auxiliando a otro equipo, de forma que se reduzca el consumo de este.

9 Resumen de presupuesto para las diversas opciones

En este apartado se pretende dar el precio de las diversas opciones consideradas para climatizar el invernadero. Estos presupuestos pueden verse desglosados en el Anexo de Presupuestos, donde podremos encontrar todas las partidas detalladas.

En esta memoria se añade este punto para conocer los precios finales previamente a la realización del estudio económico.

9.1 Presupuesto con tubos AWADUKT Thermo de Rehau

Como podemos ver desglosado en el apartado 1 del presupuesto, el coste total de la instalación del EAHE seleccionado asciende a 85525.51€.

9.2 Presupuesto con tubos normales

Como podemos ver desglosado en el apartado 2 del presupuesto, el coste total de la instalación del EAHE seleccionado asciende a 37343.11€.

9.3 Presupuesto bomba de calor

Como podemos ver desglosado en el apartado 3 del presupuesto, el coste total de la instalación de una bomba de calor con unas características equivalentes al EAHE dimensionado asciende a 8025.00€.

9.4 Presupuesto placas PCM

Como podemos ver desglosado en el apartado 4 del presupuesto, el coste total de la instalación de las placas de PCM asciende a 3190.00€.

10 Estudio económico

Mediante este punto se pretende comprobar la viabilidad económica de las diversas opciones que se han tenido en cuenta para realizar la climatización del invernadero.

Para ello, tras presupuestar los tubos AWADUKT Thermo (con tratamiento antibacteriano), tubos sin tratamiento, una bomba de calor con una aportación equivalente al EAHE y los PCMs, consideraremos el precio de la instalación y los consumos energéticos para realizar un estudio a 30 años vista, para comprobar si merece la pena instalar estos sistemas.

Para realizar este estudio consideraremos el coste fijo de las instalaciones de los EAHE y de los PCMs, a lo que restaremos el coste fijo de la instalación de la bomba de calor, y consideraremos el ahorro energético anual, para tratar de conocer el plazo de recuperación y el VAN a 30 años, vida útil de las instalaciones.

El cálculo del VAN se realizará mediante la siguiente expresión:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0 \quad (20)$$

Donde:

- V_t : representa los flujos de caja en cada periodo t . En este caso representará el ahorro energético obtenido al sustituir la bomba de calor.
- I_0 : es el valor del desembolso inicial de la inversión. En este caso lo calcularemos como el coste de la nueva instalación menos el coste de la instalación de la bomba de calor.
- n : es el número de periodos considerados. Se consideran 30 años.
- k : es el tipo de interés o tasa de actualización. Consideramos un 4%.

Además destacar que también consideraremos un precio del kWh de 0.128€, el cual ascenderá con el paso del tiempo con un interés del 5%.

10.1 Viabilidad económica EAHE con tubos AWADUKT Thermo

Se calcula el Valor Actual Neto obtenido al instalar el EAHE con una perspectiva a 30 años.

Destacar que no consideramos costes de mantenimiento para ninguna de las dos instalaciones. Nuestra hipótesis es que el coste de las piezas a cambiar tales como ventiladores, filtros, etc. de ambos equipos tiene un coste equivalente.

Tabla 28. Parámetros para cálculo del VAN del EAHE con tubos AWADUKT Thermo.

	Bomba de calor	EAHE
Horas funcionamiento	443	479
Potencia absorbida (kW)	4	0.34
Coste inicial (€)	8050	85525.51
Precio base kWh (€)	0.128	
Tasa actualización luz	0.05	
Tasa de actualización general	0.04	
Vida proyectada (años)	30	

En este caso el ahorro energético anual a lo largo de los 30 años va de 216.27 a 890.19€. A partir de los datos mostrados calculamos un Valor Actual Neto de -70283.82€. La inversión

inicial realizada no se retorna a lo largo de la vida útil del proyecto, por lo que, tomando una perspectiva de viabilidad económica, consideramos la inversión no recomendable.

10.2 Viabilidad económica EAHE con tubos “normales”

Se calcula el Valor Actual Neto obtenido al instalar el EAHE con una perspectiva a 30 años.

Destacar que no consideramos costes de mantenimiento para ninguna de las dos instalaciones. Nuestra hipótesis es que el coste de las piezas a cambiar tales como ventiladores, filtros, etc. de ambos equipos tiene un coste equivalente.

Tabla 29. Parámetros para cálculo del VAN del EAHE con tubos “normales”.

	Bomba de calor	EAHE
Horas funcionamiento	443	479
Potencia absorbida (kW)	4	0.34
Coste inicial (€)	8050	37343.11
Precio base kWh (€)	0.128	
Tasa actualización luz	0.05	
Tasa de actualización general	0.04	
Vida proyectada	30	

Igual que en el caso anterior ahorro energético anual a lo largo de los 30 años va 216.27 a 890.19€. A partir de los datos mostrados calculamos un Valor Actual Neto de -22101.42€. La inversión inicial realizada no se retorna a lo largo de la vida útil del proyecto, por lo que, tomando una perspectiva de viabilidad económica consideramos la inversión no recomendable.

10.3 Viabilidad económica de los PCM

En primer lugar debemos destacar que no podemos comparar solo los PCM contra la bomba de calor, dado que no podemos realizar una sustitución de equipos al no lograr asegurarnos los PCM una temperatura interior del invernadero siempre superior a los 8°C. Por tanto, para este estudio de viabilidad económica estudiaremos la posibilidad de implementar los PCM junto con la bomba de calor, con el objetivo de reducir el consumo de esta, y si tal reducción es suficientemente interesante como para amortizar la inversión.

Tabla 30. Parámetros para cálculo del VAN de los PCM con Bomba de calor.

	Bomba de calor	EAHE
Horas funcionamiento	443	425
Potencia absorbida (kW)	4	4
Coste inicial (€)	8050	3190
Precio base kWh (€)	0.128	
Tasa actualización luz	0.05	
Tasa de actualización general	0.04	
Vida proyectada	30	

A lo largo de los 30 años, conseguimos un ahorro energético anual que oscila de 9.68 a 39.83€, siendo un valor muy bajo para amortizar la inversión. El Valor Actual Neto calculado a partir de los parámetros mostrados es de -2868.21€. La inversión inicial realizada no se retorna a

lo largo de la vida útil del proyecto, por lo que, tomando una perspectiva de viabilidad económica, consideramos la inversión no recomendable.

11 Conclusiones

Se ha realizado la modelización de un invernadero para el cultivo de tomate considerando las condiciones ambientales y las características constructivas típicas de la zona de Almería. La modelización se ha llevado a cabo mediante el software Trnsys con la definición de la geometría, materiales y las condiciones de un cultivo de tomate para la determinación de las cargas térmicas y condiciones ambientales a lo largo del periodo de cultivo.

Con el modelo se han determinado las demandas de calor o frío a lo largo de un ciclo productivo y la eficiencia del equipo a instalar. El estudio se ha centrado sobre todo en el periodo invernal que es la época productiva de mayor rentabilidad económica y se han propuesto alternativas para evitar que la temperatura en el interior del invernadero se sitúe por debajo de los 8 °C, temperatura a la cual se detiene la producción de la planta.

En primer lugar se han analizado las operaciones de cultivo actuales, analizando el efecto del blanqueo del techo y el horario de apertura de las ventanas de ventilación sobre las condiciones ambientales en el interior del invernadero. Destacamos que en este primer estudio, pese a no obtener siempre las temperaturas deseadas, sin ningún coste obtenemos un aumento de 8 horas en el margen de temperaturas deseadas (entre 8 y 30°C) y reducimos 13 horas las que estamos por debajo de una humedad del 80%. Pese a no ser unas mejoras substanciales, no requieren de ningún consumo energético, y la instalación necesaria para monitorizar la temperatura del invernadero y realizar las operaciones de cerrado y obertura de las ventanas a mano tiene un coste muy bajo. Destacar además que estas modificaciones realizadas, están encaradas a facilitar la aportación de calor que realizará posteriormente los equipos que se instalen. Por todo ello se quiere subrayar la importancia de la automatización de los invernaderos, lo que repercutirá en un mayor rendimiento y ahorro a muy corto plazo.

A continuación se ha añadido al modelo de simulación del invernadero un intercambiador enterrado EAHE, que se situaría por debajo del invernadero a una profundidad de 2 metros. Se han estudiado diversas configuraciones y con el objetivo de minimizar el número de horas con una temperatura en el interior del invernadero por debajo de los 8°C y maximizar el COP de la instalación. Finalmente se ha seleccionado un intercambiador enterrado compuesto por 23 tubos de 38 metros de longitud y 25 centímetros de diámetro, con un caudal de 7500 kg/h, pasando el aire por el interior de los tubos a una velocidad de 1 m/s. Esta disposición nos asegura mantener siempre una temperatura superior a los 8°C, y además es la que nos da mayor COP, con un valor de 15.5.

Respecto a los PCM, el número de placas instaladas no nos permiten mantener solo con ellas la temperatura del invernadero siempre superior a 8°C. Respecto a su funcionamiento debemos destacar que se ve muy limitado por el hecho de que su aportación de calor tan solo se da durante el cambio de fase, una vez finalizada esta, se observa como baja en picado el calor desprendido, y en caso de necesitar más energía, debería obtenerse de otra fuente.

Se ha valorado la opción de añadirlos de forma complementaria a una instalación con bomba de calor, pero el ahorro energético que provocan es muy pobre (4%) debido a que solo conseguimos reducir en 18 horas el funcionamiento de la bomba de calor, siendo inviable la amortización de la inversión.

Sin embargo, un punto que debemos tener en cuenta a favor de los PCM es que en los cálculos realizados se considera una temperatura global del volumen total del invernadero, mientras que las placas están situadas entre las plantas, a escasos centímetros de estas, por tanto, al lado de las plantas podría considerarse una temperatura superior a la del invernadero, más cercana a la de la propia placa, lo que podría reducir el número de horas por debajo de 8°C. Para conocer la temperatura a la que realmente están las plantas, debería realizarse un

estudio más complejo al desarrollado en este proyecto, con un mayor número de nodos y donde se especifiquen las corrientes interiores que haya en el invernadero.

De todas formas, tal y como hemos podido comprobar, en caso de querer utilizar PCM para climatizar una instalación, es especialmente importante seleccionar uno u otro en función de las condiciones climáticas que deseamos obtener, y de las otras fuentes de calor que podamos tener. En nuestro caso, el PCM que daba mayor rendimiento variaba entre el de 9°C y el 11°C en función de si no teníamos ningún otro equipo de climatización o si actuaban como soporte de la bomba de calor.

Destacar que con los nuevos métodos de climatización implementados se ha conseguido un gran descenso de las emisiones. Con el EAHE las emisiones descienden un 91% (misma proporción que el consumo energético), mientras que los PCMs, al ser un elemento pasivo que no consume energía durante su funcionamiento, no tiene ningún tipo de emisión. En caso de funcionar como elemento de apoyo a la bomba de calor, el descenso de las emisiones sería del 4%. En caso de crearse algún impuesto que grabase los métodos menos eficientes de climatización o algún sistema de incentivos sobre sistemas de climatización de menor impacto ambiental, podría hacer más interesante la proyección económica de este tipo de instalaciones. Añadir que se abarataría la instalación de los sistemas de climatización en caso de realizar un diseño integrado ya desde la construcción del invernadero, como bien podría ser en el caso del EAHE ahorrando algunos costes como los de la excavación para la instalación de los tubos, la cual debería realizarse igualmente para cambiar los estratos del suelo por aquellos que facilitan el crecimiento del cultivo. También por el hecho de que se dimensionen los sistemas de forma que actúen complementariamente, cubriendo unos las deficiencias de otros.

Finalmente, pese a que los resultados de viabilidad económica de todas las opciones consideradas han sido negativos, debemos tener en cuenta que estas técnicas están en desarrollo, pudiendo reducirse los precios de estas o aumentado los rendimientos. En el caso del EAHE utilizar ventiladores con mayores rendimientos o una mayor conductividad de los tubos pueden ser factores a tener en cuenta. Para los PCM, un aumento del coste de la luz unido a una bajada de los precios de estas tendría un efecto similar. Por tanto cualquier salto tecnológico podría hacer variar los resultados de este proyecto, por lo que consideramos de suma importancia analizar los resultados para la fecha actual, debiendo ser revisados en el futuro.

12 Referencias

- [1] T. Soriano y N. Castilla, "Nuevas tendencias en diseño y construcción de invernaderos", 2005.
- [2] D.L. Valera, L.J. Belmonte, F.D. Molina, A. López, "Los invernaderos de Almería. Análisis de su tecnología y rentabilidad", 2014.
- [3] S. Seemann, "Configuration and Field Testing of a Liquid Desiccant Dehumidification System for Greenhouse Application", Queen's University, Kingston, 2013.
- [4] T. Singh, A. Kumar, P. Baredar, "Study on Calculation Models of Earth-Air Heat Exchanger Systems", 2014.
- [5] D. Juárez, R. Balart, S. Ferrándiz, D. García, "Estudio de materiales con cambio de fase (PCM) y análisis SEM de micro (PCM)", 2012.
- [6] A.M. Cabezas, "Eficiencia energética a través de utilización de pozos canadienses con el análisis de datos de un caso real "casa Pomaret"", 2012.
- [7] R. Misra, V. Bansal, G. Das Agrawal, J. Mathur, T.K. Aseri, "CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger", 2013.
- [8] F. Al-Ajmi, D.L. Loveday, V.I. Hnaby, "The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate", 2005.
- [9] V.Bansal, R. Misra, G.D. Agrawal, and J.Marthur, "Performance analysis of earth-pipe-air-heat exchanger for summer cooling", *Energy and Buildings*, vol.42, no.5, pp.645-658, 2010.
- [10] V.Bansal, R. Misra, G.D. Agrawal, and J.Marthur, "Performance analysis of earth-pipe-air-heat exchanger for winter heating", *Energy and Buildings*, vol.41, no.11, pp.1151-1154, 2009.
- [11] J. Pérez Parra; E. Baeza; J.I. Montero; B.J. Bailey, "Natural Ventilation of Parral Greenhouses, 2004.
- [12] D.L. Valera, F.D. Molina, A.J. Álvarez, "Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos", 2008.
- [13] D.L. Valera, F.D. Molina, A.J. Álvarez, "Protocolo de auditoría energética en invernaderos, Auditoría energética de un invernadero para cultivo de flor cortada en Mendigorria, 2008.
- [14] V.P. Sethi; S.K. Sharma, "Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications", 2008.
- [15] T. Singh, A. Kumar y P. Baredar, "Study on Calculation Models of Earth-Air Heat Exchanger Systems", 2014.
- [16] F. Al-Ajmi, D. L. Loveday, and V. I. Hanby, "The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate," *Building and Environment*, vol. 41, no. 3, pp. 235–244, 2006.
- [17] V. P. Sethi and S. K. Sharma, "Thermal modeling of a greenhouse integrated to an aquifer coupled cavity flow heat exchanger system," *Solar Energy*, vol. 81, no. 6, pp. 723–741, 2007.
- [18] A. Shukla, G. N. Tiwari, and M. S. Sodha, "Thermal modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and an earth-air heat exchanger," *Building and Environment*, vol. 41, no. 7, pp. 843–850, 2006.
- [19] M. K. Ghosal, G. N. Tiwari, and N. S. L. Srivastava, "Thermal modeling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: an experimental validation," *Energy and Buildings*, vol. 36, no. 3, pp. 219–227, 2004.
- [20] J. Darkwa, G. Kokogiannakis, C. L. Magadzire, and K. Yuan, "Theoretical and practical evaluation of an earth-tube (E-tube) ventilation system," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 2-3, pp. 728–736, 2011.
- [21] G. N. Tiwari, M. A. Akhtar, A. Shukla, and M. Emran Khan, "Annual thermal performance of greenhouse with an earth-air heat exchanger: an experimental validation," *Renewable Energy*, vol. 31, no. 15, pp. 2432–2446, 2006.
- [22] M. K. Ghosal, G. N. Tiwari, D. K. Das, and K. P. Pandey, "Modeling and comparative thermal performance of ground air collector and earth air heat exchanger for heating of greenhouse," *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 6, pp. 613–621, 2005.

- [23] X. Li, J. Zhao, and Q. Zhou, "Inner heat source model with heat and moisture transfer in soil around the underground heat exchanger," *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, no. 10, pp. 1565–1577, 2005.
- [24] P. Hollmuller, "Analytical characterisation of amplitude dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, no. 22, pp. 4303–4317, 2003.
- [25] H. Wu, S. Wang, and D. Zhu, "Modelling and evaluation of cooling capacity of earth-air-pipe systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 48, no. 5, pp. 1462–1471, 2007.
- [26] K. H. Lee and R. K. Strand, "The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 4, pp. 486–494, 2008.
- [27] V. Bansal, R. Misra, G.D. Agrawal, and J. Marthur, "Performance analysis of earth-pipe-air-heat exchanger for winter heating", *Energy and Buildings*, vol.41, no.11, pp.1151-1154, 2009.
- [28] V. Bansal, R. Misra, G.D. Agrawal, and J. Marthur, "Performance analysis of earth-pipe-air-heat exchanger for summer cooling", *Energy and Buildings*, vol.42, no.5, pp.645-658, 2010.
- [29] ATECYR, "Guía técnica. Diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado", 2012.
- [30] M.C. García-García, A.J. Céspedes, P. Lorenzo, J.J. Pérez-Parra, M.C. Escudero, M.C. Sánchez-Guerrero, E. Medrano, E. Baeza, J.C. López, J.J. Magán, M.D. Fernández, S. Parra, D.E. Meca, J.C. Gázquez, R. García y C. Pérez, "El sistema de producción hortícola de la provincia de Almería", 2016.
- [31] Barragán-Medrano, Juan Carlos¹; Ríos-Orozco, Carlos Omar; Rodríguez-Muñoz, Norma Alejandra, Escobedo-Bretado Jorge Alberto, Nájera-Trejo, Mario; Martín-Domínguez Ignacio Ramiro, "Dimensionamiento de sistema de climatización para un invernadero", 2016.
- [32] M^a Caridad de los Reyes, "Aplicaciones de la energía solar al tratamiento térmico de suelos de invernaderos", 2007.
- [33] Cálculo del volumen de aplicación de fitosanitarios en el cultivo de tomate en invernadero, 18/05/2017. Available: <http://www.innovagri.es/investigacion-desarrollo-inovacion/calculo-del-volumen-de-aplicacion-de-fitosanitarios-en-el-cultivo-de-tomate-en-invernadero.html>
- [34] M. D. Fernández, S. Bonachela, F. Orgaz, R. Thompson, J.C. López, M. R. Granados, M. Gallardo, E. Fereres, "Measurement and estimation of plastic greenhouse reference in a Mediterranean climate", 2010.
- [35] R. Baeza, F. Alonso, J.I. Contreras, "Cálculo de la evapotranspiración en cultivo de tomate en invernadero. Utilización de series climáticas históricas vs. a tiempo real", 2015.
- [36] Catálogo de ventiladores tipo CPB de la casa Soler & Palau, 28/06/2017. Available: http://www.solerpalau.es/media/catalogos/series/es_cbp.pdf
- [37] Catálogo de ventiladores tipo HXM de la casa Soler & Palau, 28/06/2017. Available: <http://www.solerpalau.es/producto/comercial/ventiladores-helicoidales-murales.html?cat=1332>
- [38] Catálogo de ventiladores tipo HCBB/HCBT de la casa Soler & Palau, 28/06/2017. Available: <http://www.solerpalau.es/producto/comercial/ventiladores-helicoidales-murales.html?cat=714>
- [39] Catálogo de ventiladores tipo HXBR/HXTR de la casa Soler & Palau, 28/06/2017. Available: <http://www.solerpalau.es/producto/comercial/ventiladores-helicoidales-murales.html?cat=1330>
- [40] Catálogo de equipos de climatización de Mitsubishi, 28/06/2017. Available: http://www.mitsubishielectric.es/aire-acondicionado/sites/default/files/minitarifa_2017_baja.pdf
- [41] Variedad de PCMs ofrecidos por la casa RubiTherm, 30/06/2017. Available: <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>
- [42] IDAE, "Factores de emisión de CO₂ y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector edificios en España", 2014

Álvaro Rodríguez Almaraz

**Sistemas de climatización de bajo impacto ambiental
para invernaderos**

**Trabajo Fin de Máster
dirigido por el Dr. Joan Manel Vallès Rasquera**

Máster en Ingeniería Industrial

Anexo 1. Justificaciones del modelo invernadero



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2017

Índice del anexo de justificaciones del modelo invernadero

1	Complemento creación modelo invernadero	2
1.1	Cargas térmicas	2
1.1.1	Intercambio de calor con el suelo	2
1.1.2	Radiación absorbida por el suelo y las plantas	3
1.1.3	Ganancia interna por ocupación	7
1.1.4	Ganancia efecto cultivo. Evapotranspiración	8
1.1.5	Comprobación resultados evapotranspiración	13
2	Optimización mediante técnicas pasivas.....	19
2.1	Modelo 1	19
2.2	Modelo 2	22
2.3	Modelo 3	25
3	Análisis de los diversos modelos.....	29

1 Complemento creación modelo invernadero

1.1 Cargas térmicas

1.1.1 Intercambio de calor con el suelo

A la hora de calcular el flujo de calor con el suelo se han estudiado dos alternativas, caracterizando el terreno en Trnsys o bien implementando las ecuaciones que aparecen en la guía de "Ahorro y eficiencia energética en invernaderos" [12] como una gain del suelo y dando al terreno una conductividad de 0.

1.1.1.1 Modelo guía eficiencia energética

Por conducción, hay una transferencia de calor en el suelo del invernadero, cuya temperatura tiene un ΔT con las capas más profundas del suelo. También se realiza intercambio de calor con el terreno perimetral al invernadero, aunque en este caso no se modelará dicho caso.

El modelo actual se centrará en la transmisión de calor que tenemos entre la superficie y los estratos más profundos, la cual se estima en un 10% de las pérdidas de calor que puede llegar a tener un invernadero. Modelamos el flujo de calor según la siguiente ecuación [12].

$$Q_{sue} = K_s \cdot S_c \cdot (T_i - T_s) / p \quad (3)$$

Donde:

K_s = Coeficiente de intercambio térmico a través del suelo. A se muestra una tabla con valores típicos de conductividad térmica de distintos suelos.

Material	K_s (W/m·K)
Arena de cuarzo ^a	7,7
Arena de río ^a	4,4
Arena de granito ^a	2,7
Grava ^b	2,3-2,8
Tierra húmeda ^b	2,0
Tierra seca ^b	1,0
Lana de roca ^c	0,038-0,048

Figura 55. Conductividad térmica de algunos tipos de suelo, K_s [12].

En nuestro caso escogemos Tierra seca, que consideramos el más similar al que pueda tener nuestro suelo al estar situado en El Ejido. Realizamos un factor de conversión de W/(m·K) a kJ/(h·m·K), unidad que utiliza Trnsys para sus cálculos.

S_c = Superficie cubierta por el invernadero (m²).

T_i = Temperatura del invernadero. Utilizamos los datos de los valores de temperatura ambiente que da el type 56 de Trnsys (°C).

T_s = Temperatura del suelo. Utilizamos la temperatura a 10 metros de profundidad, en la cual se puede considerar constante e igual a la media de la temperatura ambiente a lo largo del año (°C).

P= Profundidad de la temperatura del suelo tomada (m).

Esta carga debe ser añadida dentro del Type 56 como un "Wall gain", de forma que Trnsys la lea como una carga conductiva.

1.1.1.2 Caracterización del suelo en Trnsys

Para ello debemos crear una capa de suelo con las propiedades del terreno que tendremos, donde se nos pide la conductividad, densidad y capacidad del suelo.

- Conductividad: 3.6 kJ/h·m·K (ver figura 33).
- Densidad: 1130 Kg/m³ [32]
- Capacidad: 1.06 KJ/Kg·K [32]. El calor específico del suelo depende de sus componentes, que presentan valores de calores específicos de 0,79 J/g·°C, en el caso de la arena, 1,96 J/g·°C en el caso de la materia orgánica y 0,96 J/g·°C cuando se trata de arcilla. Se puede calcular como suma del producto de los calores específicos de cada componente del suelo por la masa de cada uno referida a la masa unidad del suelo, o bien realizar la determinación directa del mismo, como se ha hecho en este caso.

Además hay que añadir el espesor que tendrá el suelo, formado en este caso por esta única capa. Trnsys nos permite dar espesores entre 0 y 1 metro. Utilizamos 0.6 metros, que es el espesor que tienen los suelos arenados que se añaden en los invernaderos.

Finalmente, calculamos la temperatura del suelo a estos 0.6 metros de profundidad mediante el type 77 de Trnsys. Esta debe ser añadida al modelo para que calcule la transferencia de calor que hay entre el suelo y el invernadero.

1.1.1.3 Comparación modelos

Ambos modelos dan resultados muy similares de temperaturas en el interior del invernadero, con diferencias de ±1%. Nos decidimos a utilizar la caracterización completa del terreno en Trnsys ya que se considera una caracterización más cercana a las propiedades del suelo, y no solo la conductividad, único parámetro utilizado en la guía de "Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos".

1.1.2 Radiación absorbida por el suelo y las plantas

1.1.2.1 Modelo guía Ahorro y Eficiencia energética en invernaderos

Debe considerarse la radiación absorbida por las plantas y el suelo [12].

$$\alpha_s = \alpha_{pla} \cdot f_p + \alpha_{sue} \cdot (1 - f_p) \quad (4)$$

Donde:

α_s = Coeficiente de absorción global.

α_{sue} = Coeficiente de absorción del suelo.

α_p = Coeficiente de absorción de las plantas.

f_p = Fracción del suelo cubierta por las plantas.

En primer lugar, estimamos el coeficiente de suelo cubierto por las plantas.

Destacar que en los meses de verano, que el invernadero está parado para labores de mantenimiento, el coeficiente sería de 0. Durante el ciclo de cultivo, este debe ser calculado mediante una estimación desarrollada en base a las disposiciones típicas de los cultivos de tomate en invernaderos.

Generalmente se colocan las filas de tomateras de dos en dos, con una separación entre ellas de 0.5m y dejando un espacio para el paso del personal y facilitar la recolección de 1.5m.

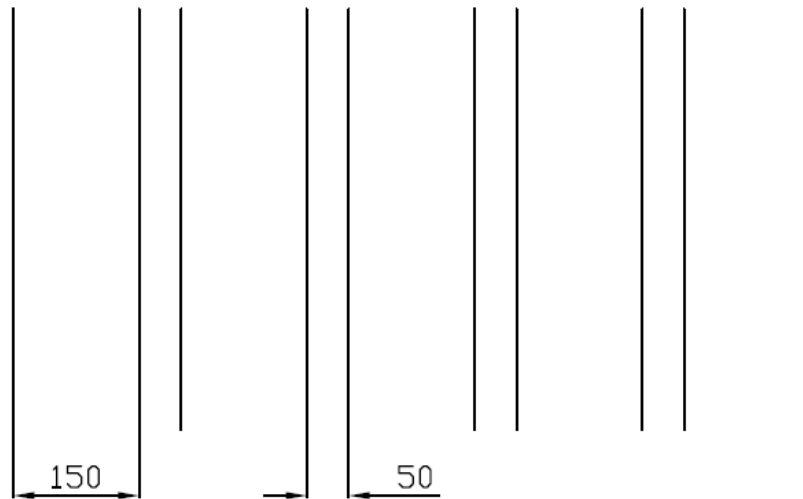


Figura 56. Separación entre líneas de cultivo.

Además, debe considerarse que cada tomatera, al poco tiempo de su trasplante, ya ocupa una superficie, sobresaliendo por la línea teórica sobre la que se ha plantado 0.25m por cada lado. Esto provoca que al final la distancia real entre tomateras separadas sea de un metro, mientras que las que están juntas, estén pegadas, sin ninguna separación que permita llegar a la radiación solar hasta el suelo.

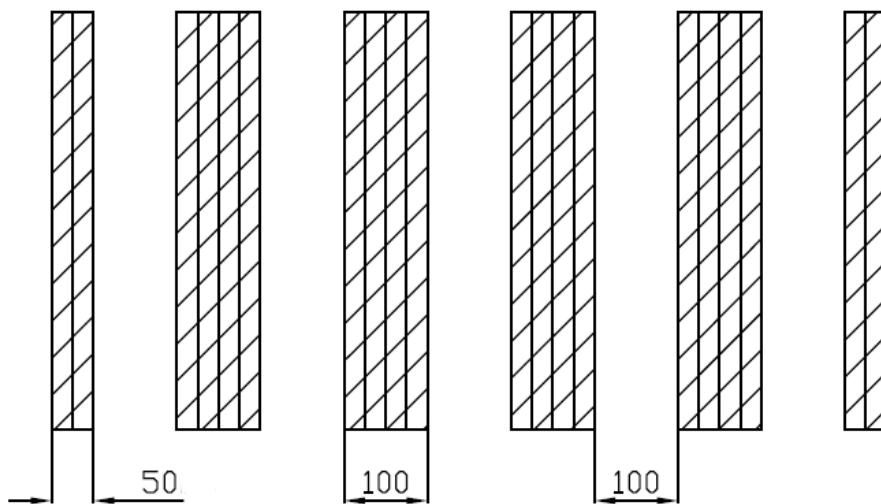


Figura 57. Superficie cubierta por el cultivo.

Por tanto, se considera que el 50% de la superficie del invernadero está cubierta por las plantas.

La evolución de la fracción del suelo cubierta por las plantas es:

El coeficiente de absorción del suelo α_{sue} lo obtenemos de la tabla de valores de albedo, a partir de la siguiente operación:

$$\alpha_{sue} = 1 - \rho_{sue} \quad (2)$$

Para ello, debemos tener en cuenta que los suelos de invernaderos están formados por un suelo "arenado" el cual tiene diversas capas.

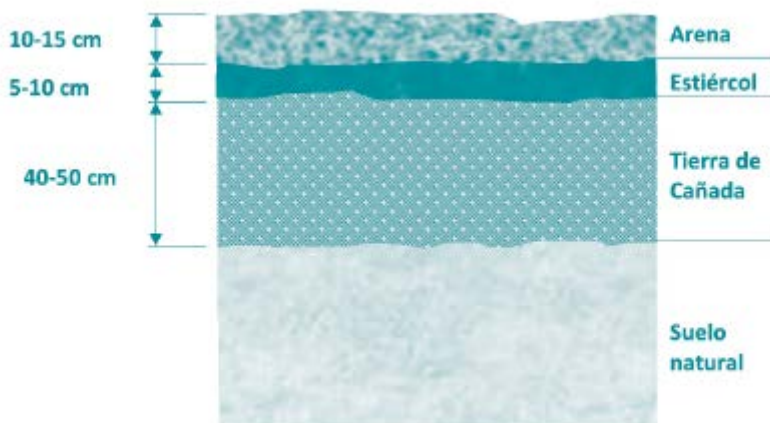


Figura 58. Esquema de un suelo arenado [2].

En nuestro caso, dado que en la capa superior del suelo del invernadero es arena, utilizamos el valor de arena seca, de 0.18.

Tipo de superficie	Albedo (ρ_{sue})
Arcilla húmeda	0,02-0,08
Arcilla seca	0,16
Arena húmeda	0,09
Arena seca	0,18
Césped	0,15-0,28
Rastrojo	0,15-0,17
Tela blanca	0,30

Figura 59. Valores de albedo para las diferentes superficies de suelo [12].

Para el valor del coeficiente de absorción de las plantas α_p , debemos tener en cuenta que este depende del área foliar de la planta, la cual va variando a lo largo de año en función del crecimiento de esta.

En primer, lugar destacar que según diversas publicaciones [33], el valor del área foliar varía entre 2 y 3.5, considerando el más utilizado el de 3, en el cual se estima el valor medio de la planta a lo largo de su vida.

En nuestro caso consideramos durante las dos primeras semanas posteriores al trasplante una área foliar de 2, la cual irá aumentando durante un mes hasta llegar a una área foliar de 3, la cual consideraremos constante hasta el final de nuestra simulación.

Tabla 31. Tabla con valores de área foliar a lo largo de la simulación.

Hora del año	Día del año	Área foliar
0	01-ene	3.5
1416	01-mar	3
4344	01-jul	3
4344	01-jul	0
5448	15-ago	0
5448	15-ago	2
5640	23-ago	2
6144	13-sep	3.5
8760	01-ene	3.5
10176	01-mar	3
13104	01-jul	3

A partir de estos valores, se puede calcular el coeficiente de absorción.

LAI	$\alpha_{\text{pla}} (400-2.800 \text{ nm})$	$\alpha_{\text{pla}} (2.800-40.000 \text{ nm})$
2,0	0,65	0,72
2,5	0,71	0,80
3,0	0,75	0,85
3,5	0,78	0,89
4,0	0,81	0,92

Figura 60. Coeficientes de absorción de una cubierta vegetal para la radiación solar y térmica en función del índice de área foliar, LAI [12].

Obteniendo:

Tabla 32. Valores de los coeficientes de absorción a lo largo de la temporada.

Hora del año	Día del año	Área foliar	$\alpha_{\text{planta}} (\text{SW})$	$\alpha_{\text{planta}} (\text{LW})$
0	01-ene	3.5	0.78	0.89
1416	01-mar	3	0.75	0.85
4344	01-jul	3	0.75	0.85
4344	01-jul	0	0	0
5448	15-ago	0	0	0
5448	15-ago	2	0.65	0.72
5640	23-ago	2	0.65	0.72
6144	13-sep	3.5	0.78	0.89
8760	01-ene	3.5	0.78	0.89
10176	01-mar	3	0.75	0.85
13104	01-jul	3	0.75	0.85

En Trnsys deberemos añadir el coeficiente de radiación solar que llega al suelo, calculado a partir del f_p . Se añade el valor de absorción del suelo en función del escogido por tablas.

Respecto a la absorción de las plantas, Trnsys nos permite calcular la radiación absorbida por los elementos que tenemos dentro del invernadero y que evitan que toda la radiación llegue a la superficie del suelo. En este caso, solo nos permite añadir un único valor, introduciendo el de onda corta, que representa prácticamente la totalidad de la radiación que se transmite al interior del invernadero.

1.1.2.2 Introducción del modelo en Trnsys

Para poder introducir la caracterización del apartado anterior, debemos tener en cuenta que tenemos que ajustarnos al type 56, donde deberemos añadir los valores calculados previamente.

En primer lugar introducimos el factor “ f_p ” en el suelo. Para ello Trnsys nos permite introducir un factor de radiación de onda corta que llega al suelo denominado *geosurf*. En nuestro caso lo definimos de la siguiente forma:

$$geosurf = 1 - f_p \quad (5)$$

Este factor nunca puede ser mayor de 1, dado que para uno se supone que toda la radiación que se transmite a través de la cubierta llega al suelo.

Por tanto a la hora de definir el suelo de nuestro invernadero, deberemos añadir en este la absorción, donde utilizaremos los valores de arena seca (ver figura 60).

Para la radiación que no llega al suelo, Trnsys supone que esta llega a los objetos que tendríamos dentro de nuestro invernadero. El type 56 permite dar un valor de absorción media para todo lo que haya dentro. En nuestro caso utilizamos las absorciones que tendrá el tomate en función de su área foliar. Mediante el Type 14-h generamos una función que vaya dando los valores de la tabla 9.

Destacar que Trnsys solo nos permite modelar mediante estos parámetros la radiación de onda corta. La radiación de onda larga solo se tiene en cuenta sobre las diversas superficies de las paredes.

1.1.3 Ganancia interna por ocupación

Las ganancias por ocupación serán debidas al calor sensible y al calor latente generado por las personas que puedan encontrarse dentro del invernadero y por el efecto de las plantas. TRNBuild nos permite modelar el efecto térmico de las personas mediante la normativa ISO 7730.

Consideramos dentro del invernadero que tenemos siempre una persona dentro.

Dentro del efecto que puede provocar una persona, nos permite escoger diversas actividades, en función de las cuales variarían los valores de calor sensible y latente. Añadimos actividad de trabajo con movimiento a velocidad de 1.3m/s.

1.1.4 Ganancia efecto cultivo. Evapotranspiración

1.1.4.1 Modelos de ecuación para definir evapotranspiración

Existen modelos de ecuación utilizados para calcular la evapotranspiración producida por las plantas dentro de un invernadero. Las más utilizadas debido a su menor error respecto a los datos reales son la de Penman-Monteith y la de Hargreaves [34].

Estas ecuaciones dan un valor de evapotranspiración ET_0 , el cual se multiplica por un coeficiente de cultivo, K_c , con el cual se obtiene el valor exacto en función del tipo de planta que tengamos en el invernadero. Para el tomate puede considerarse un valor medio de K_c cercano a 1.0, aunque el método más preciso es dar valores de K_c en función de la época del año y la Temperatura Térmica Acumulada (TTA) [35].

Ecuación de Penman-Monteith:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (6)$$

Donde:

- Δ =Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).
- R_n =La radiación neta sobre el cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).
- G =Flujo de calor al suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).
- γ =Constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).
- U_2 = Velocidad media del viento a una altura de 2 metros (m s^{-1}).
- T =Temperatura media día ($^\circ\text{C}$).
- e_a =Presión de vapor actual (kPa).
- e_s =Presión de vapor de saturación (kPa).

Uno de los inconvenientes que presenta esta ecuación es que para conocer el valor del pendiente de la curva de presión de vapor y de la presión de vapor de saturación necesitamos conocer la temperatura interior del invernadero, las cuales a su vez dependen de las temperaturas y niveles de humedad relativa interior, algo que desconocemos y que de hecho esperamos como resultado de nuestra simulación. Lo mismo sucede para calcular la presión de vapor actual, que depende de la humedad relativa que tengamos en el invernadero, la cual desconocemos y varía en función del efecto de las plantas. Además, algunos valores como la velocidad interior del viento, varían en función de la disposición y geometría del invernadero, siendo difíciles de conocer.

Ecuación de Hargreaves:

$$ET_0 = 0.0023R_a\tau(T_{max} - T_{min})^{\frac{1}{2}}(T + 17.8) \quad (7)$$

Donde:

- R_a =Radiación extraterrestre (mm dia^{-1})
- τ =Transmisividad solar del material de cubierta.
- T =Temperatura media ($^\circ\text{C}$)
- T_{max} =Temperatura máxima ($^\circ\text{C}$)
- T_{min} =Temperatura mínima ($^\circ\text{C}$)

Volvemos a tener el mismo problema, dado que las temperaturas que necesitamos para conocer la evapotranspiración son las interiores del invernadero.

Estas ecuaciones están orientadas a averiguar la parte de la humedad que tendríamos en el invernadero debido al efecto de las plantas, y así averiguar su efecto térmico. Como en nuestro caso desconocemos las temperaturas del invernadero, nos decantamos por una

segunda opción, donde a partir de datos previos en invernaderos de la zona tomaremos los valores de evapotranspiración, los cuales introduciremos a Trnsys para realizar la simulación.

1.1.4.2 Calculo evapotranspiración mediante función

Para realizar una simulación que tenga en cuenta la variabilidad del efecto de la evapotranspiración a lo largo del tiempo la mejor opción que nos permite Trnsys es introducirla como una función cuyas variables sean la radiación solar sobre el invernadero y el día del año (con el cual van vinculados valores como temperaturas, humedad relativa del ambiente, velocidad del viento, etc.)

1.1.4.2.1 Modelo Simplificado FAO-Radiación

Para ello se utiliza el modelo simplificado de FAO-Radiación [34], utilizado también en otros artículos que realizan diversos estudios climáticos en invernaderos de la zona quedando el modelo contrastado.

Para los días del 1 al 220 ($JD < 220$):

$$ET_0/R_s = 0.288 + 0.0019 \cdot JD \quad (8)$$

Para los días del 220 al 365 ($JD > 220$):

$$ET_0/R_s = 1.339 - 0.00288 \cdot JD \quad (9)$$

Estas ecuaciones se generan a partir de la toma de datos de radiación solar incidente en el interior de un invernadero (mm/día) y la evapotranspiración medida (L/día). En las siguientes figuras se muestran los gráficos con las tomas de valores realizadas en el artículo, tomando las muestras en uno de los invernaderos experimentales de la "Fundación Cajamar", entre los cuales está el utilizado para el modelo de este proyecto.

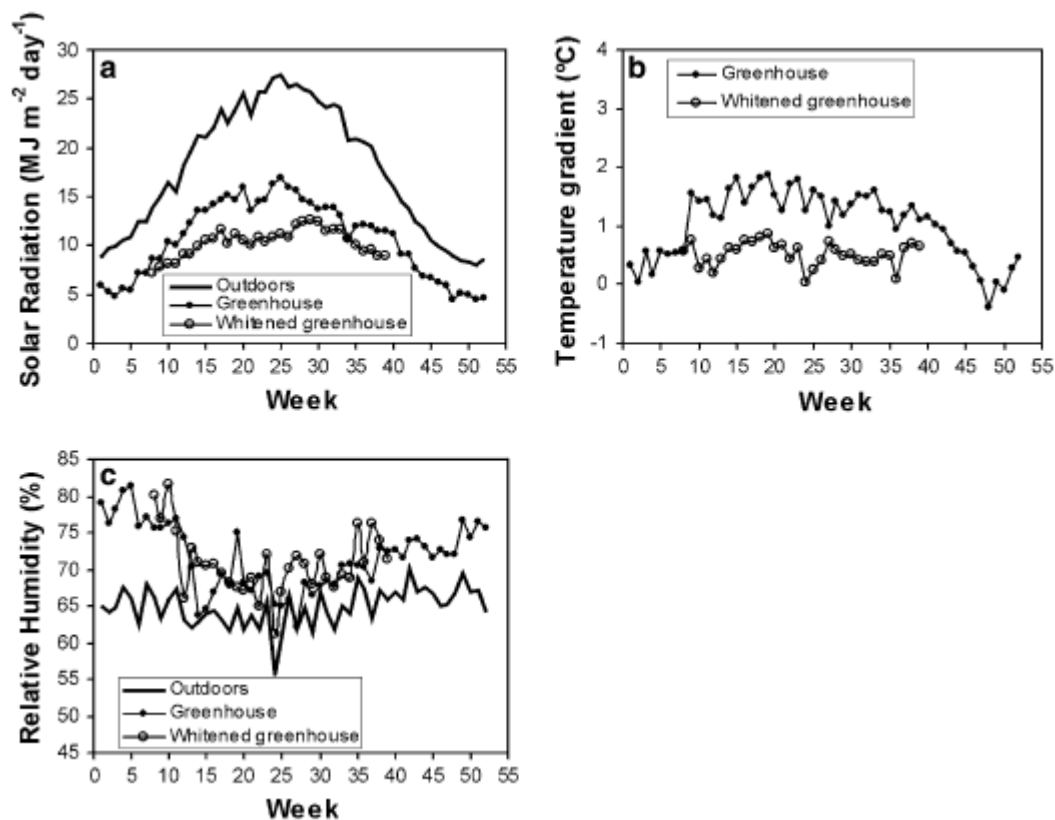


Figura 61. Evolución anual de los valores diarios, media semanal de la radiación solar (a), gradiente de temperatura entre el interior y el exterior (b) y humedad relativa (c), medidas exteriores (de 1993 a 2004) e interiores sin (de 1993 a 1999) y con blanqueado (de 2000 a 2004) [34].

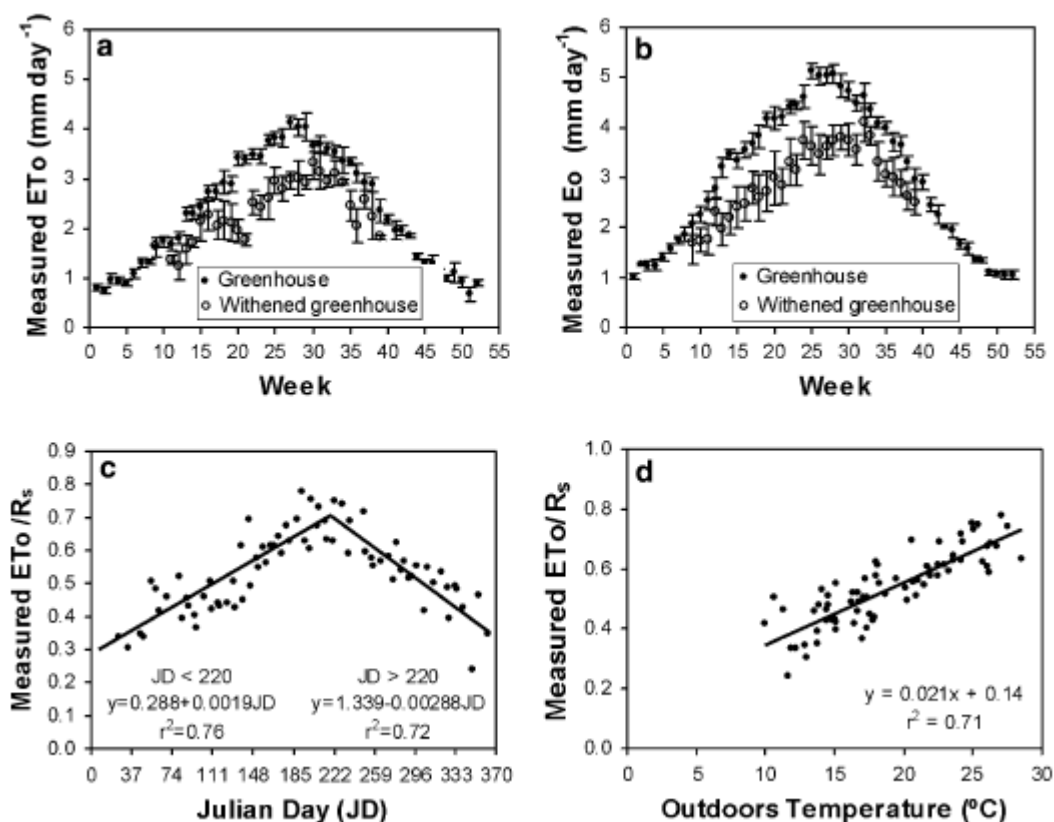


Figura 62. Evolución anual de los valores diarios, con media semanal, de la ET_0 (a) y E_0 (b), medida en el interior de un invernadero plástico con (de 2000 a 2004) y sin blanqueado (de 1993 a 1999). (c) Evolución anual del ratio entre los valores diarios, con media semanal, de la ET_0 y la radiación solar (R_s) dentro de un invernadero plástico; (d) Relación entre este ratio y la temperatura exterior. Cada punto de (c) y (d) corresponde con una semana entre los años 1993 y 1994 [34].

En la figura 38 c podemos ver la evolución de la ET_0/R_s , a partir de la cual se obtienen las ecuaciones previas. Se muestra la dispersión de puntos con su correlación lineal. **A pesar de estar los puntos bastante dispersados**, se observa una clara tendencia según avanzan los días. Teniendo en cuenta que son datos climatológicos el hecho de que exista una cierta variabilidad se puede considerar normal y se considera este método como la mejor alternativa para aplicar los cambios de la evapotranspiración a lo largo del año.

Para poder añadir las ecuaciones previas al modelo de Trnsys, estas deben editarse. Para ello deberemos añadir la radiación solar que tenemos en el emplazamiento de nuestra simulación (Almería). Utilizamos el output del Type 56 QSOLTR que representa la radiación total de onda corta transmitida a través de las ventanas de todo el invernadero (kJ/h). Este valor ya tiene en cuenta las características de las ventanas, geometría, orientación y superficie total del invernadero. Destacar que debemos pasar la radiación de kJ/h a mm/día. Para ello utilizamos el valor del calor latente de vaporización del agua. Consideramos este valor constante, utilizando el que tiene el agua a 20°C.

Destacar que deberemos pasar los kJ/h a mm/día, dado que es la unidad utilizada en la expresión para el cálculo de la evapotranspiración. Para ello utilizamos el calor de evaporación del agua.

Evapotranspiración para $JD < 220$:

$$ET_0 \left(\frac{L}{h} \right) = \frac{ET_0}{R_s} \cdot \frac{QSOLTR}{QVaporización} \quad (10)$$

$$= \frac{(0.288 + 0.0019 \cdot JD)(mm \ m^{-2} \ dia^{-1} / (mm \ m^{-2} \ dia^{-1}))}{2450kJ/kg} \cdot \frac{QSOLTR(kJ \ h^{-1})}{2450kJ/kg}$$

Evapotranspiración para JD>220:

$$ET_0 \left(\frac{L}{h} \right) = \frac{ET_0}{R_s} \cdot \frac{QSOLTR}{QVaporización} \quad (11)$$

$$= \frac{(1.339 - 0.00288 \cdot JD)(mm \ m^{-2} \ dia^{-1} / (mm \ m^{-2} \ dia^{-1}))}{2450kJ/kg} \cdot \frac{QSOLTR(kJ \ h^{-1})}{2450kJ/kg}$$

Añadir que los valores de evapotranspiración anterior están calculados en base a un invernadero con su superficie cultivada al 100% por hierba perenne, que se utiliza como referencia para extrapolar a otros cultivos.

1.1.4.3 Evapotranspiración real

A partir del valor de ET_0 calculamos la evapotranspiración real de nuestro cultivo, ET . Para ello tendremos en cuenta el factor de cultivo y el coeficiente de minoración previamente calculado.

$$ET \left(\frac{L}{h} \right) = ET_0 \cdot K_c \quad (12)$$

El factor de cultivo, K_c , varía a lo largo del año en función del área foliar y el desarrollo de los frutos. El crecimiento de la planta va en función del Tiempo Térmico Acumulado, el cual se calcula como la temperatura media de cada día [35].

TTA (°C)	K_c
<200	0,2
200<TTA<722	0,2 + 0,00268 (TTA-200)
TTA>722 (hasta 1 de enero)	1,6
TTA>722 (desde 1 de enero a 1 de marzo)	K_c día anterior - 0,01
TTA>722 (desde 1 de marzo)	1,0

Figura 63. Valores de K_c según el modelo K_c -TTA para el cultivo de tomate. TTA=Tiempo Térmico Acumulado [35].

Teniendo en cuenta que el tiempo térmico empieza a contar a partir del día de trasplante, el 23 de Agosto, pasamos a dar las fechas con las que asemejamos los tiempos térmicos.

Los 200°C acumulados serían 8 días, teniendo la primera fase del 23 al 31 de Agosto. La segunda fase, que va de 200 a 722°C acumulados va del 31 de Agosto al 21 de Septiembre, teniendo 3 semanas. Para estas dos primeras etapas hemos partido de temperatura media unos 25°C. Esta temperatura se calcula como la media entre la temperatura máxima y mínima diaria.

Las siguientes etapas ya vienen con las fechas preestablecidas.

Para introducir estos valores utilizamos el Type 14-h, el cual nos permite crear funciones para las horas/días de simulación.

Para calcular el calor absorbido al evaporar las cantidades de agua determinadas por la función, se multiplica la evapotranspiración por el calor latente de vaporización del agua.

$$\text{Calor latente } \left(\frac{kJ}{h}\right) = ET \cdot \lambda = ET \cdot 2450 kJ/kg \quad (13)$$

Nos decantamos por esta opción para realizar la simulación dado que nos permite sacar el máximo provecho de Trnsys, realizando cálculos para las diferentes condiciones del año, pese a que pueda haber diversidad en algunos datos al no coincidir los años típicos introducidos en Trnsys con los utilizados en el estudio donde se obtuvo la ecuación. Pese a ello consideramos que la tendencia que sigue la evapotranspiración hará más real nuestra simulación, variando su efecto en función del día y la hora de este.

Al añadir las ganancias al modelo de Trnsys, consideramos la carga térmica como una carga conductiva. Además debemos añadir también el aumento de humedad que se produce dentro del invernadero.

1.1.5 Comprobación resultados evapotranspiración

Calcularemos mediante trnsys la radiación transmitida al interior del invernadero y añadiendo las ecuaciones, calcularemos la evapotranspiración. Trataremos los datos obtenidos para poderlos comparar directamente con los gráficos de las figuras 16 y 17 que a continuación volveremos a mostrar.

En primer lugar mostramos los valores de la radiación horizontal diaria que tenemos en Almería. En la figura se muestran los valores diarios de la radiación de onda corta en azul y la radiación total en rojo.

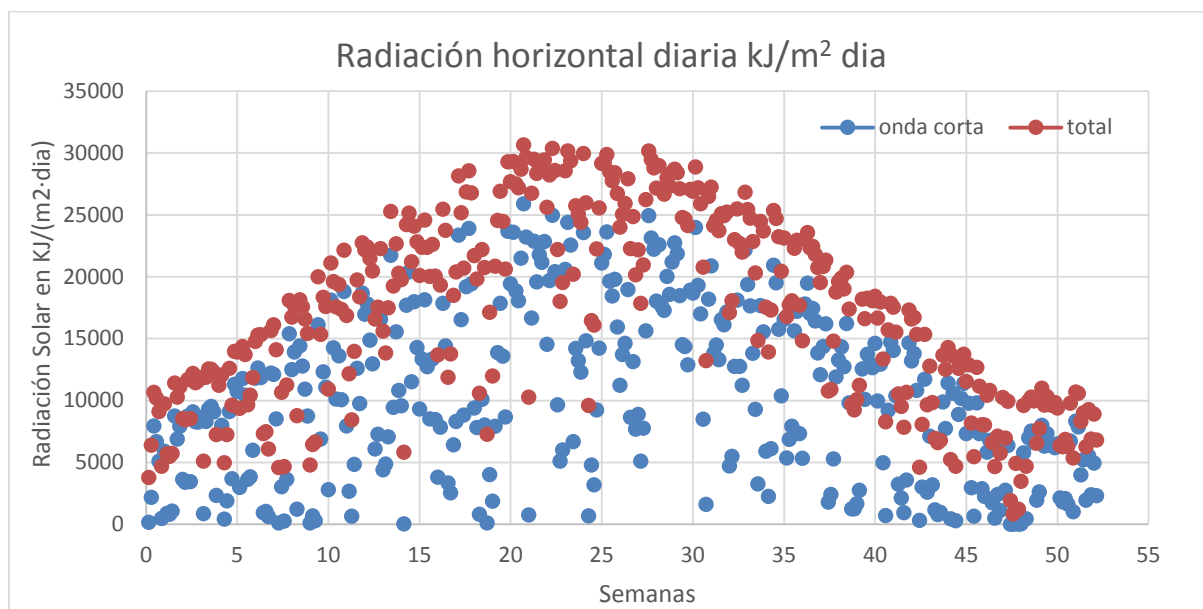


Figura 64. Gráfico con valores de la radiación horizontal diaria en el exterior del invernadero.

Para poder comparar dichos valores con los que aparecen en la figura 37 a, realizamos la media semanal. Este procedimiento permite desprestigiar el efecto que tenemos en los días nublados, los cuales apenas tenemos radiación de onda corta. Se obtiene el siguiente gráfico.

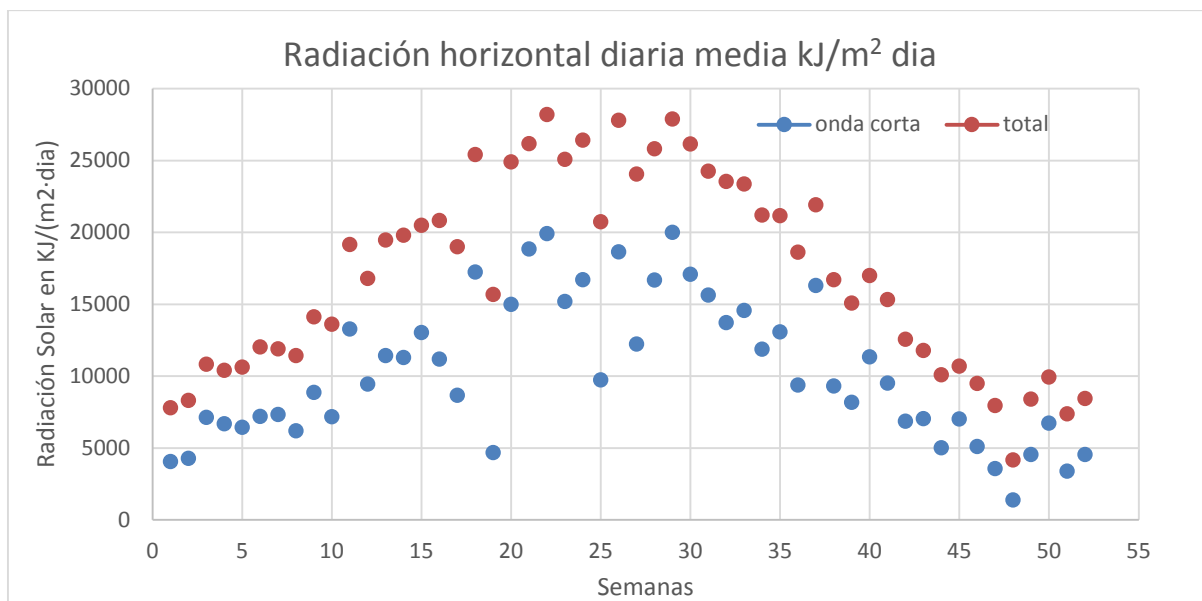


Figura 65. Gráfico con valores de la radiación horizontal diaria en el exterior del invernadero, media semanal.

Tras realizar el diseño del invernadero en Trnsys podemos calcular la radiación transmitida de onda corta al interior del invernadero, de forma que podamos comprobar que la transmisividad dada a los materiales es la adecuada.

En el primer gráfico volvemos a mostrar los valores diarios obtenidos en Trnsys.

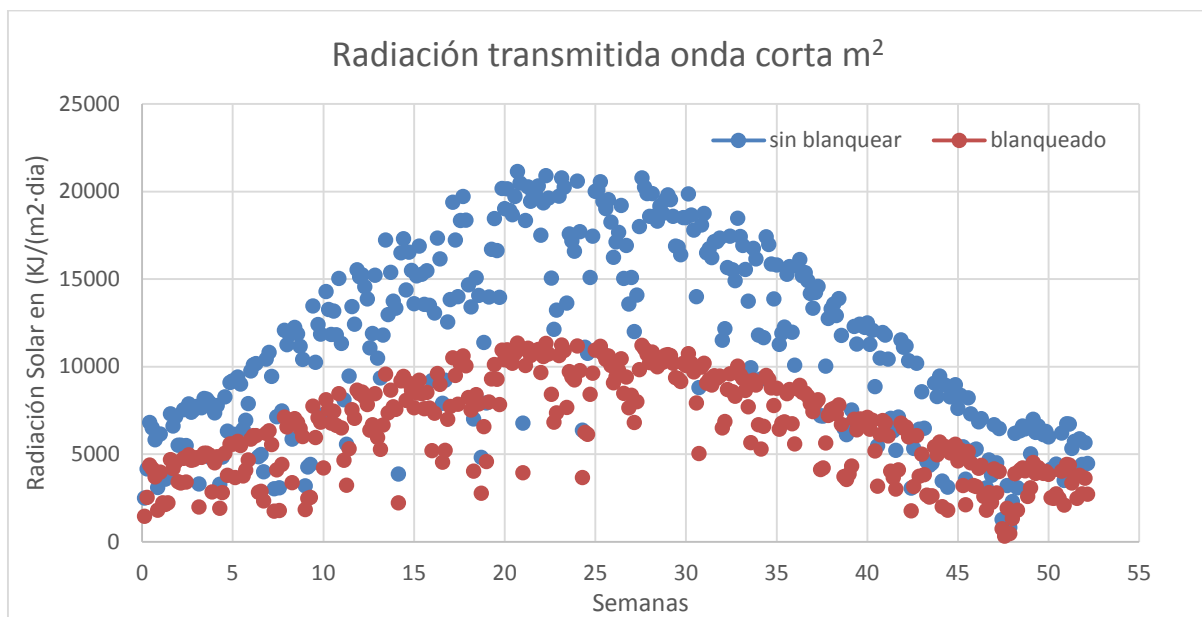


Figura 66. Gráfico con valores diarios de radiación de onda corta transmitida al interior del invernadero. Calculados valores para una año entero con el invernadero blanqueado y sin blanquear.

Para poder comparar con la figura 37 a volvemos a repetir el procedimiento anterior y calculamos la media semanal.

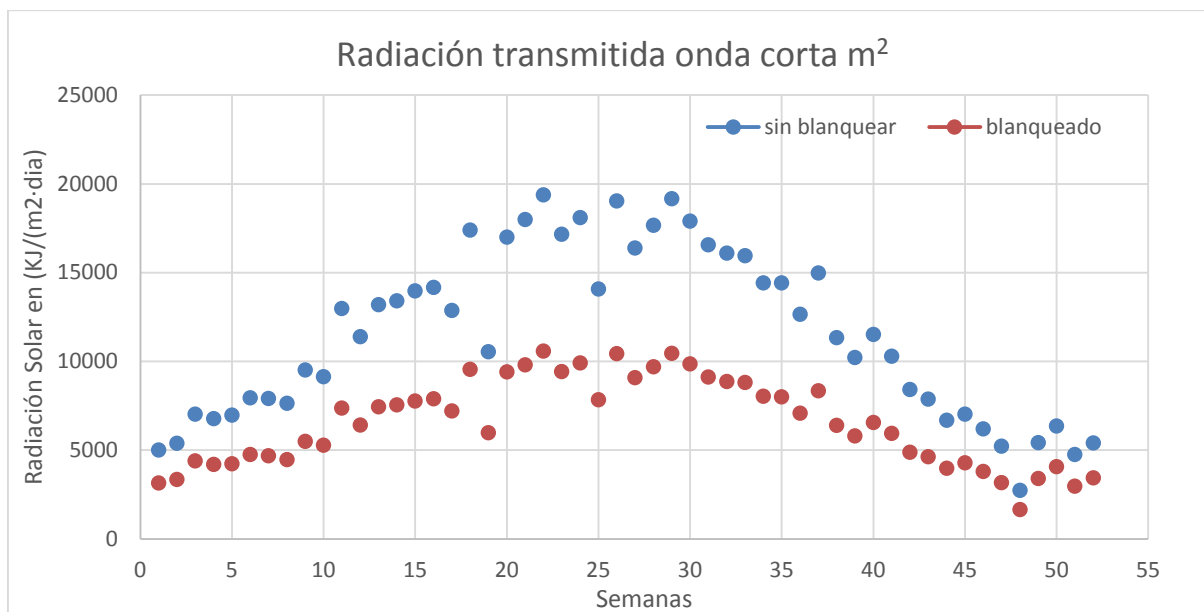


Figura 67. Gráfico con valores diarios (media mensual) de radiación de onda corta transmitida al interior del invernadero. Calculados valores para un año entero con el invernadero blanqueado y sin blanquear.

Para facilitar la visualización de la comparación, realizamos un zoom de la figura 37 a.

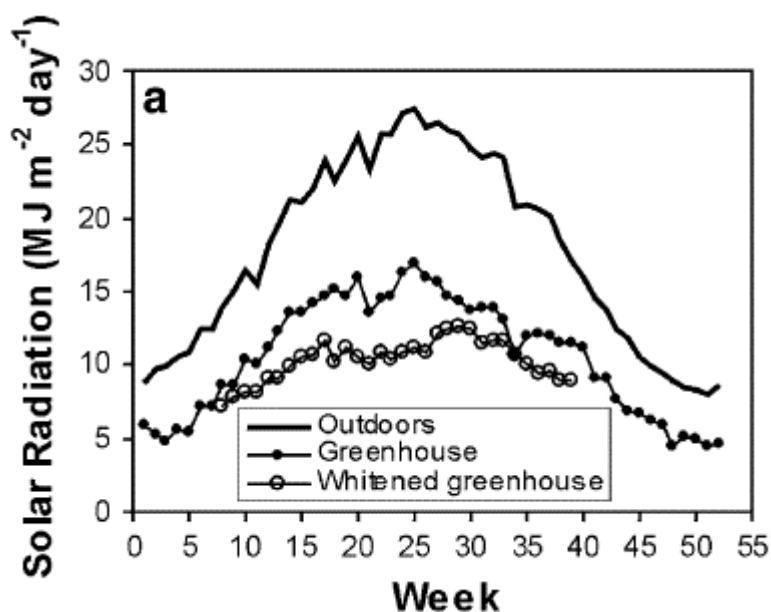


Figura 68. Radiación solar en un invernadero de la región de Almería (zoom de la figura 37 a) [34].

Mediante los dos primeros gráficos obtenidos se compara la radiación exterior. Podemos ver que la nube de puntos de la radiación total exterior encaja con la tendencia de la media mensual que se utiliza en el artículo.

Mediante el tercer y cuarto gráfico se comparan los valores de la radiación transmitida al interior. En este caso podemos ver como la radiación de onda corta, a la cual se hace referencia siempre en la bibliografía como la utilizada para el cálculo de la evapotranspiración encaja con

los valores obtenidos mediante la función de Trnsys QSolTR. Vemos que tanto para el PEBD blanqueado como sin blanquear coinciden las tendencias, por lo que podemos dar por buena la caracterización del PEBD realizada anteriormente.

Para comparar la evapotranspiración, solo podremos comprobar la ET_0 , y no la ET específica para nuestro cultivo. En primer lugar calcularemos la ET_0 total para nuestro invernadero. Tras ello, haremos la media mensual y graficaremos la ET_0 por metro cuadrado de invernadero.

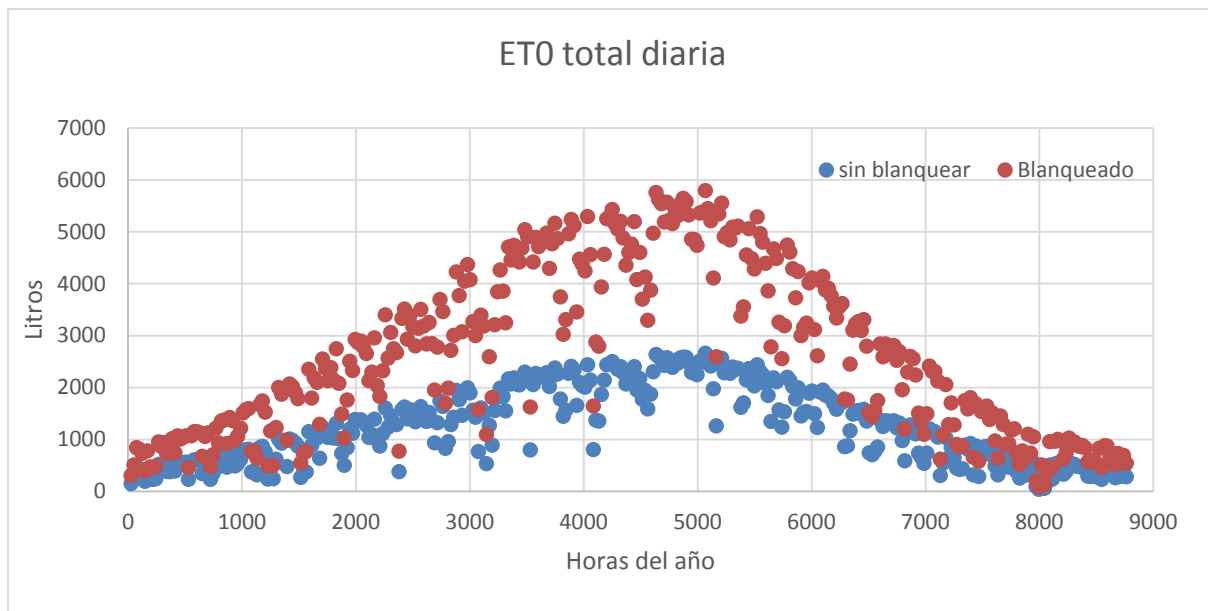


Figura 69. Gráfico con valores diarios de evapotranspiración para todo un año con el invernadero blanqueado y sin blanquear. Valores calculados a partir de las ecuaciones 10 y 11.

Para realizar la comparación con la figura 38 a, cambiamos los ejes, pasando a litros por metro cuadrado de invernadero y pasando de horas del año a semanas. Mostramos los valores diarios realizando la media mensual.

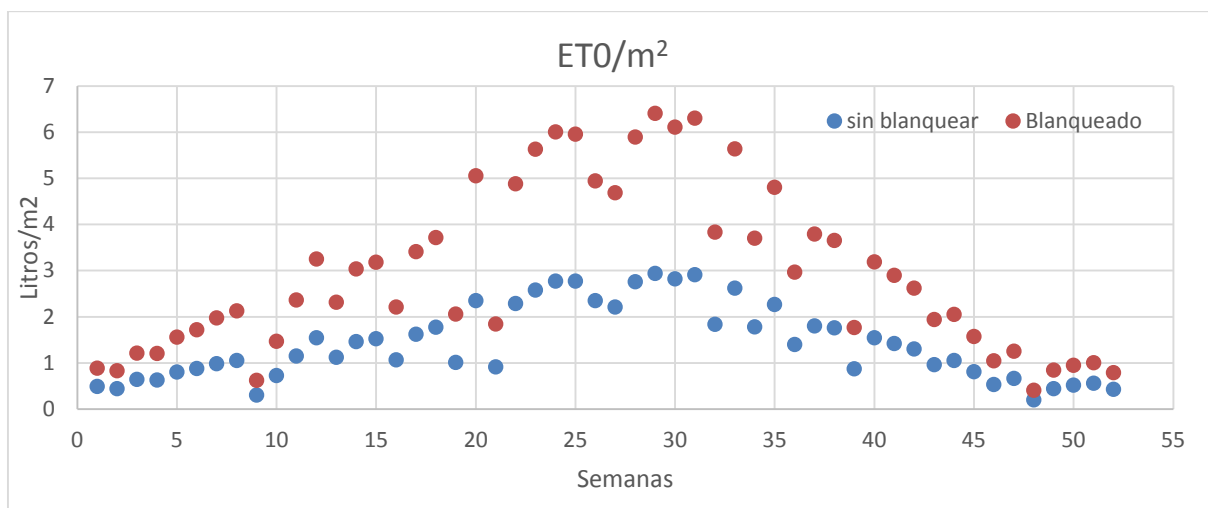


Figura 70. Gráfico con valores diarios (media semanal) de evapotranspiración para todo un año con el invernadero blanqueado y sin blanquear. Valores calculados a partir de las ecuaciones 10 y 11.

Igual que para la radiación, realizamos un zoom de la figura 38 a para poder comparar con mayor facilidad los valores de ET_0 .

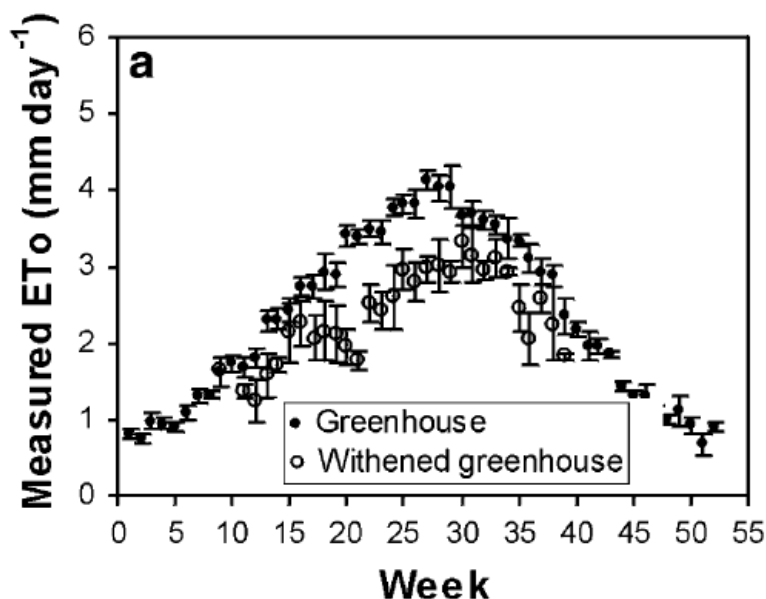


Figura 71. Evapotranspiración unitaria medida en un invernadero de la región de Almería (zoom de la figura 38 a) [34].

Observamos las tendencias para el invernadero blanqueado y sin blanquear. Podemos ver que hay diferencias en los valores respecto al gráfico del artículo. En el caso del invernadero blanqueado los valores son muy similares, en cambio con el invernadero sin blanquear la evaporotranspiración sería superior (1L-2L más). Se considera que esta variación es fruto de la aproximación que se realiza a la hora de crear un modelo con ecuaciones respecto al seguimiento del invernadero real. Pese a ello, como esta desviación para los valores sin blanquear se produce en los meses de verano, cuando simulamos con las paredes blanqueadas, podemos despreciar esta desviación.

Para minimizar los errores, se introduce el factor de K_c , para intentar que esta simulación de evaporotranspiración sea lo más similar para nuestro cultivo. En nuestro caso la evaporotranspiración ET obtenida sigue el siguiente modelo.

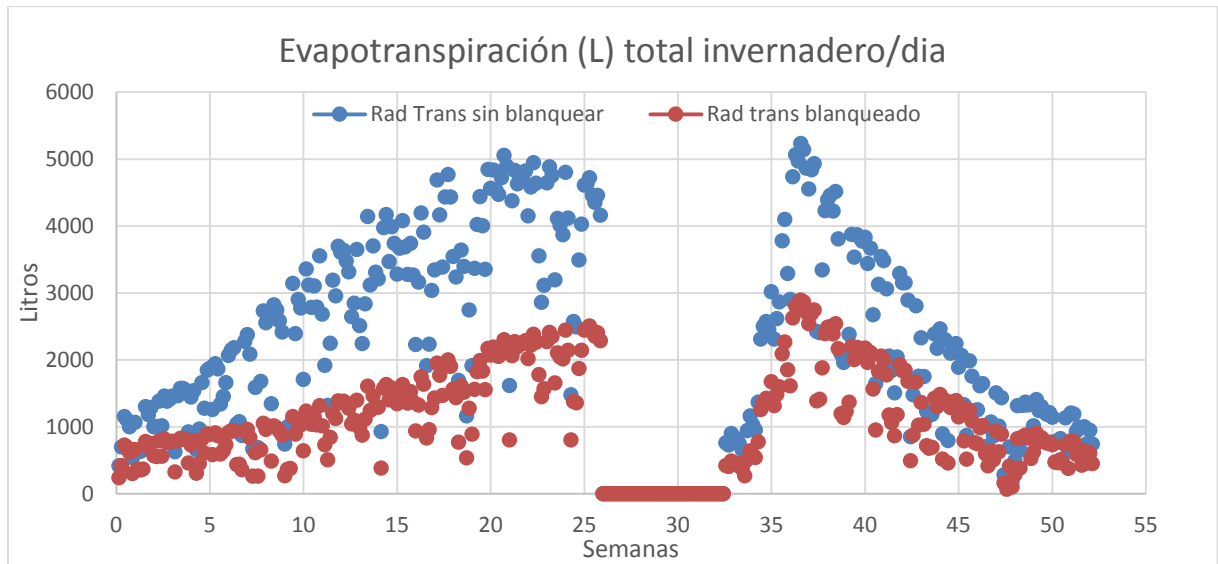


Figura 72. Evapotranspiración (ET) diaria en el invernadero modelado a lo largo de un año.

2 Optimización mediante técnicas pasivas

En este punto del Anexo mostramos con más detalle el apartado 3.7 de la memoria. Además de mostrar los gráficos de todo el año, observaremos los días 25 y 26 de Febrero con mayor detalle para poder comprobar la evolución de la temperatura y la humedad relativa y poder comparar más visualmente los modelos. Destacar que el time-step utilizado para las simulaciones es de 1 hora.

En primer lugar realizamos unas simulaciones sin añadir equipos que puedan regular la temperatura del invernadero. Estas simulaciones tienen por objetivo conocer las condiciones de partida del invernadero y tener una base para poder comparar los resultados obtenidos en cada caso respecto a la situación inicial.

Además, se realizarán diversos modelos. Empezando en uno más básico con las condiciones típicas para los invernaderos descritas tanto en los artículos como por los agricultores de tomate. En función de los resultados obtenidos en estas se aplicaran ligeras variaciones que faciliten el trabajo de los equipos que vayamos a instalar.

2.1 Modelo 1

Tras introducir en Trnsys el clima de Almería, los parámetros de ventilación natural, características del suelo, la superficie del suelo que cubren las plantas, los materiales de cubierta, la evapotranspiración y los coeficientes de absorción de las plantas con las fechas y valores comentados en el apartado 7, realizamos una primera simulación. A continuación mostramos los gráficos de la evolución de las Temperatura y la humedad relativa tanto interior como exterior.

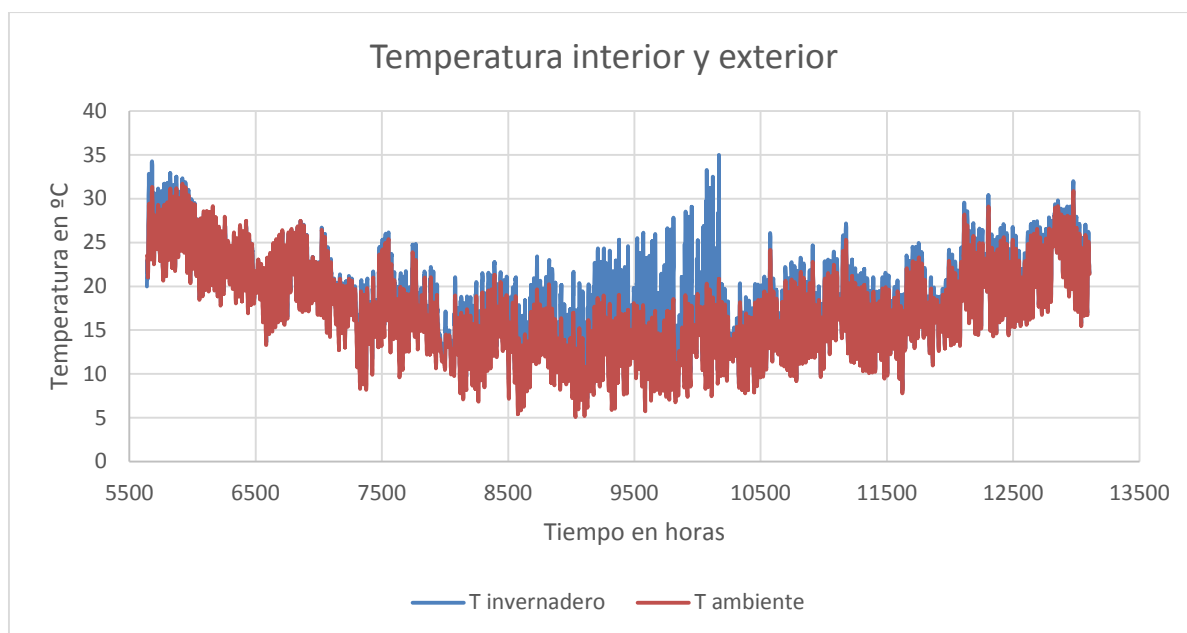


Figura 73. Gráfico con los perfiles de temperaturas en el interior y exterior del invernadero a partir de las condiciones iniciales.

Comparando la temperatura interior con la exterior se aprecia que son excepcionales los casos en los que la temperatura interior sea inferior a la exterior. Puede haber algunas horas que se dé este caso, a primera hora de la mañana debido a la inversión térmica que provoca el efecto de evapotranspiración.

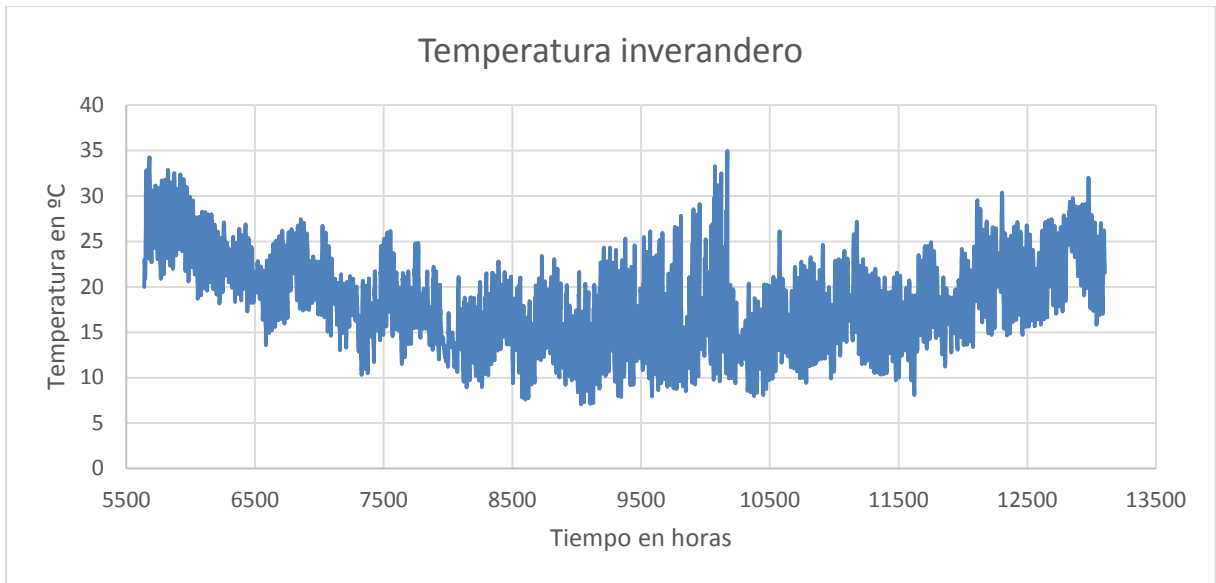


Figura 74. Gráfico con los perfiles de temperaturas en el interior del invernadero a partir de las condiciones iniciales.

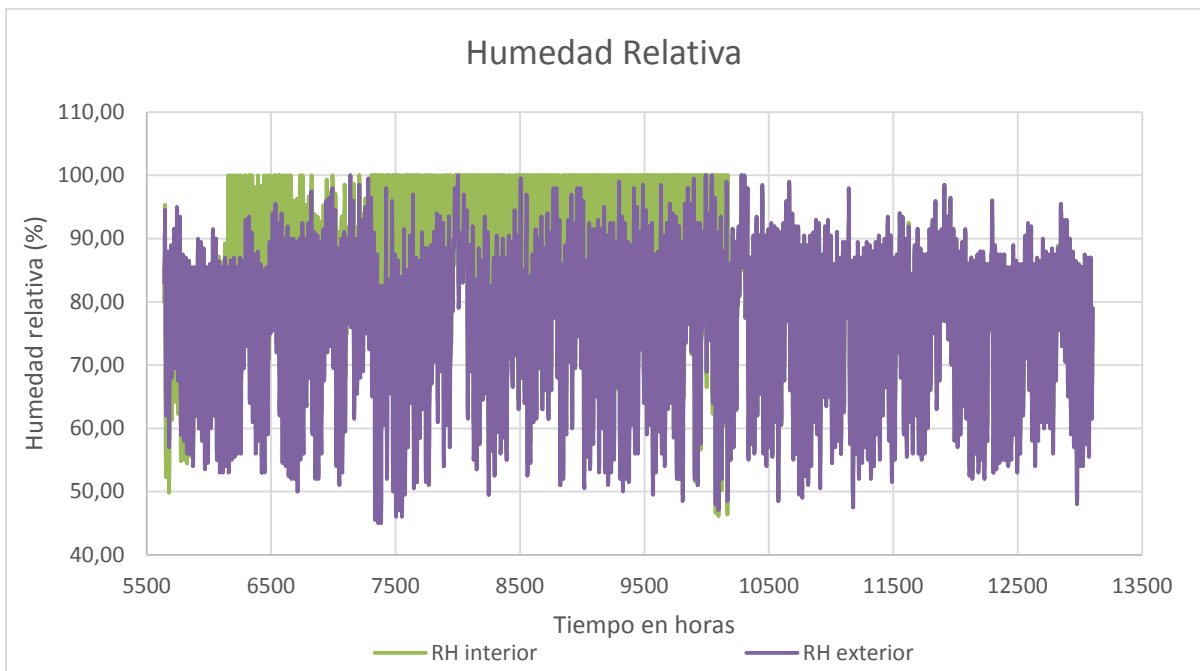


Figura 75. Gráfico con los perfiles de humedad relativa en el interior y exterior del invernadero a partir de las condiciones iniciales.

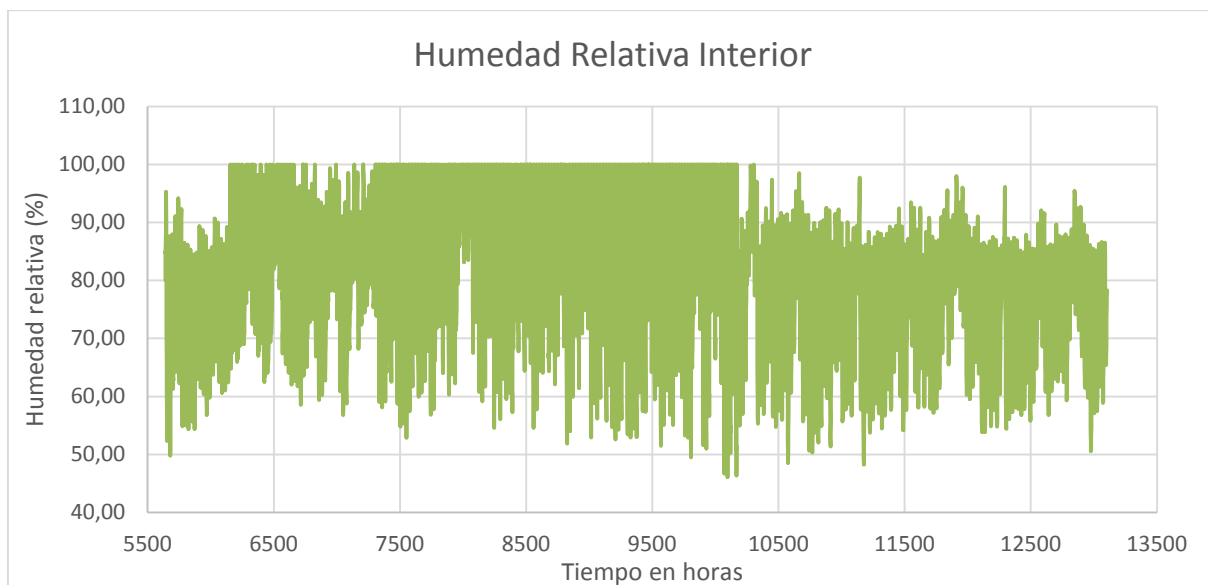


Figura 76. Gráfico con los perfiles de humedad relativa en el interior y del invernadero a partir de las condiciones iniciales.

A continuación mostramos la evolución de las temperaturas y humedad relativa para los días 25 y 26 de Febrero.

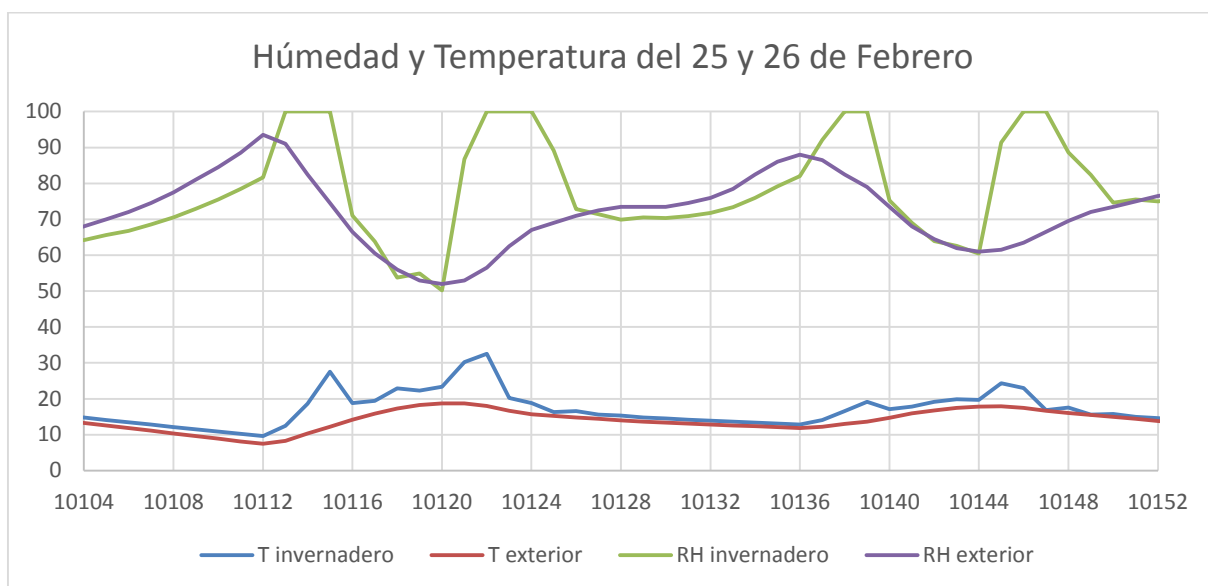


Figura 77. RH y T de los días 25 y 26 de Febrero en el interior del invernadero y en el exterior para el Modelo 1.

En este gráfico podemos ver claramente como antes de las 12 y después de las 16 horas, cuando las ventanas están cerradas, se disparan las temperaturas sobrepasando los 20 grados, e incluso llegando a los 30°C. Además el aumento de humedad relativa al tener cerradas las ventanas provoca que estemos en estas franjas de máxima temperatura con una humedad relativa del 100%.

Para poder interpretar mejor esta información a lo largo de todo el año, realizamos una tabla donde contabilizamos el número de horas donde se superan los 30°C y 26°C y se baja de 12°C y de 8°C, temperaturas, siendo estas el rango de temperaturas óptimas y las temperaturas máximas y mínima biológica, donde se para el crecimiento del cultivo. Además indicaremos Las horas que estamos fuera de los valores aconsejados de humedad relativa

(entre 40 y 80%). Se estudiará esta información desde el 23 de Agosto, día en el que consideramos que se realiza el trasplante hasta el 31 de mayo, fecha final actual de cultivo y hasta el 30 de junio, para observar si al instalar el equipo hay una mejora apreciable este último mes y merecería la pena alargar la temporada.

Tabla 33. Horas fuera de rango de temperatura óptima y de temperatura biológica con el invernadero hasta finales de Mayo y hasta finales de Junio para el Modelo 1.

Fechas simulación (h)	5640-12384	5640-13104
Suma horas simulación	6744	7464
Horas T> 26º	385	542
Horas T> 30º	93	100
Horas T< 12º	779	779
Horas T< 8º	25	25
Horas RH>80	2934	3163
Horas RH<40	0	0

Observamos que durante 93 horas superamos los 30°C, pero llama la atención, tal y como podemos ver en el gráfico, una gran cantidad de estas están ubicadas en torno a las 10.000 horas. Estas fechas las ubicaríamos en la segunda quincena de Febrero. Esto es debido a que en esta primera hipótesis no se realiza el blanqueo de la cubierta hasta inicios de Marzo (10176). Por tanto, a finales de febrero ya tenemos una alta radiación y se acumula una gran cantidad de calor en el invernadero, provocando estas altas temperaturas. Para solventar este punto, adelantaremos el blanqueo hasta la hora 9864 (15 de Febrero) y así evitar que en estas fechas las Temperaturas pasen de los 30°C.

Destacar que nos decantamos por esta opción, y no por aumentar la tasa de infiltración (aumento de la ventilación natural), ya que por la tarde el invernadero ya lo tenemos abierto, es por la noche cuando lo tenemos cerrado en esta época del año, y no nos interesa abrirlo porque durante las primeras horas del día por esta época aún tenemos bajas temperaturas, lo que nos podría provocar un descenso en el interior, generando una demanda de calor innecesaria.

2.2 Modelo 2

Repetimos la simulación adelantando las fechas de blanqueo, lo que se traduce en una reducción de la transmisividad durante las fechas anteriormente marcadas.

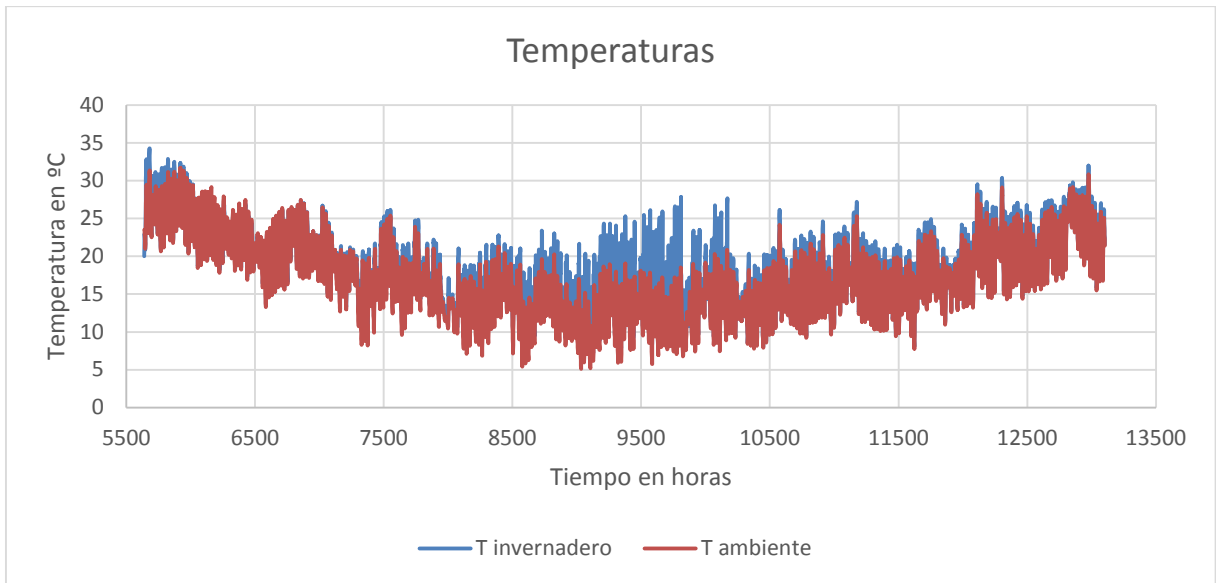


Figura 78. Gráfico con los perfiles de temperaturas en el interior y exterior del invernadero adelantando la fecha de blanqueo inicial.

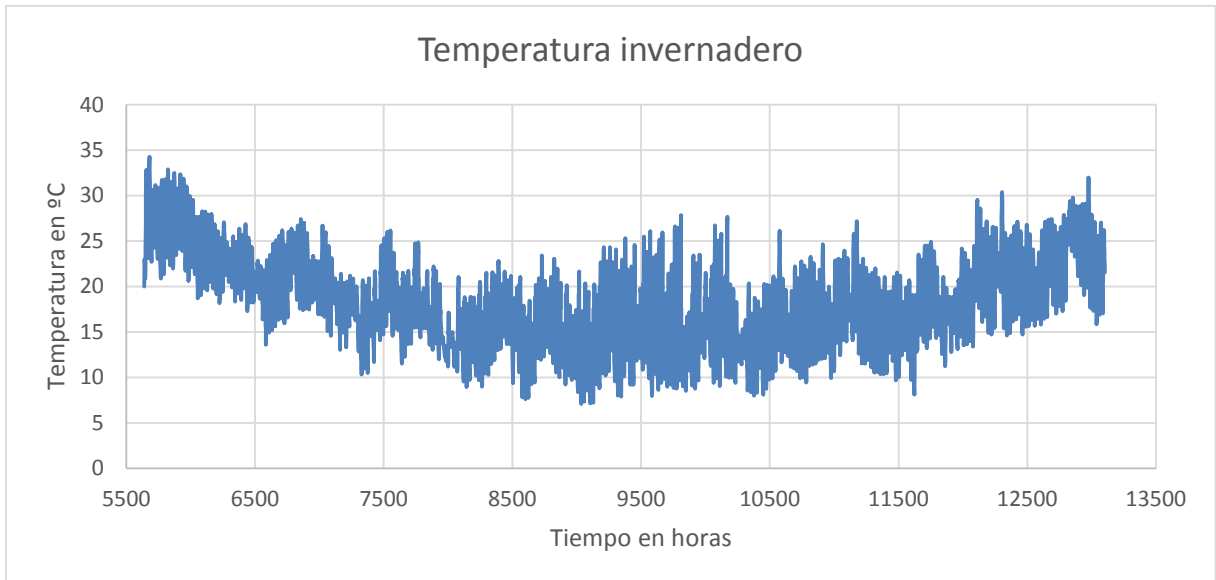


Figura 79. Gráfico con los perfiles de temperaturas en el interior del invernadero adelantando la fecha de blanqueo.

Podemos ver como la variación realizada evita que en el mes de Febrero alcancemos temperaturas superiores a los 30°C.

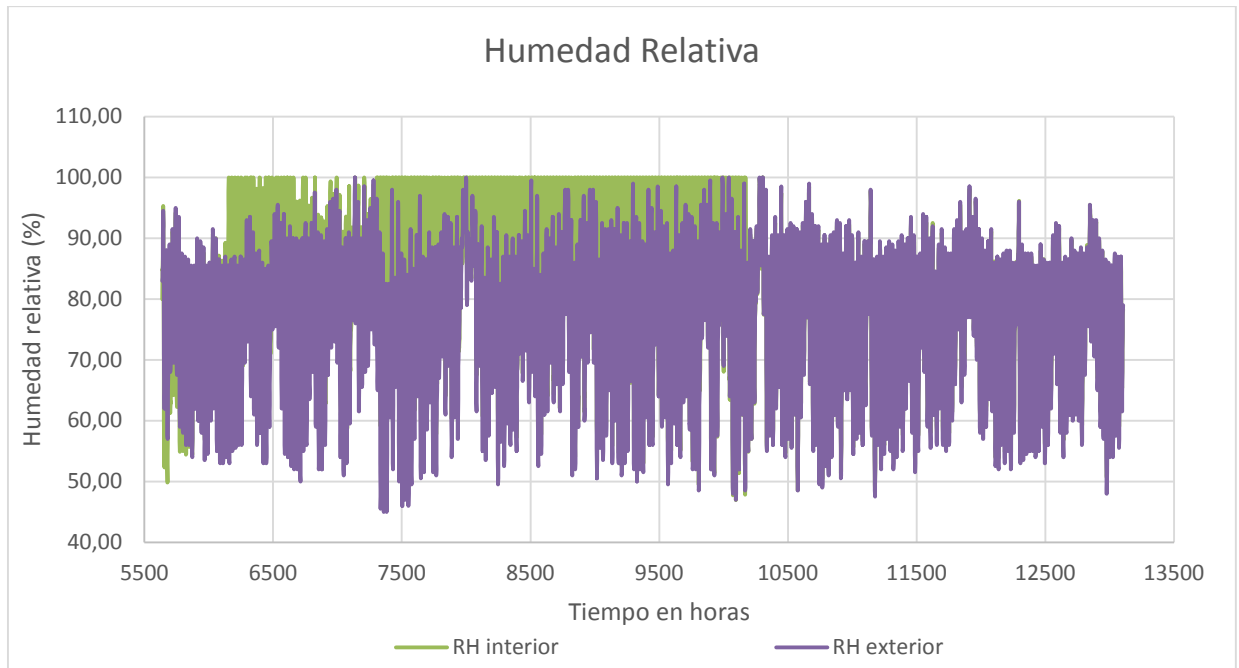


Figura 80. Gráfico con los perfiles de humedad relativa en el interior y exterior del invernadero adelantando la fecha de blanqueo.

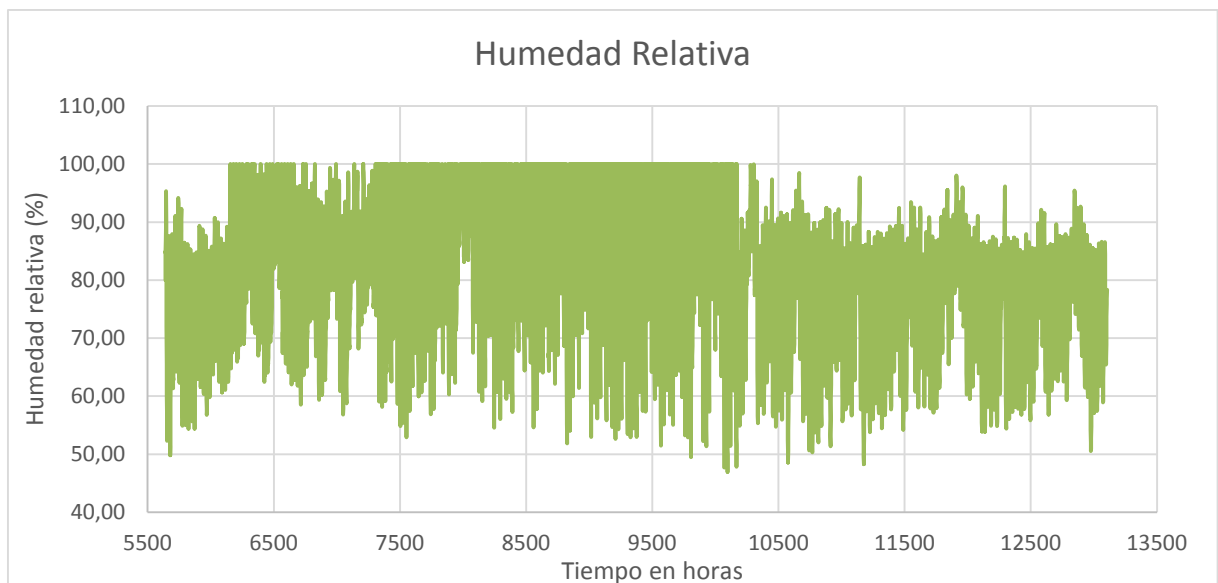


Figura 81. Gráfico con los perfiles de humedad relativa en el interior y del invernadero adelantando la fecha de blanqueo.

En la siguiente grafica podemos ver cómo, respecto al caso anterior, conseguimos reducir las temperaturas. Nunca llegamos a los 30°C, manteniéndonos siempre en una temperatura ligeramente superior a la del exterior.

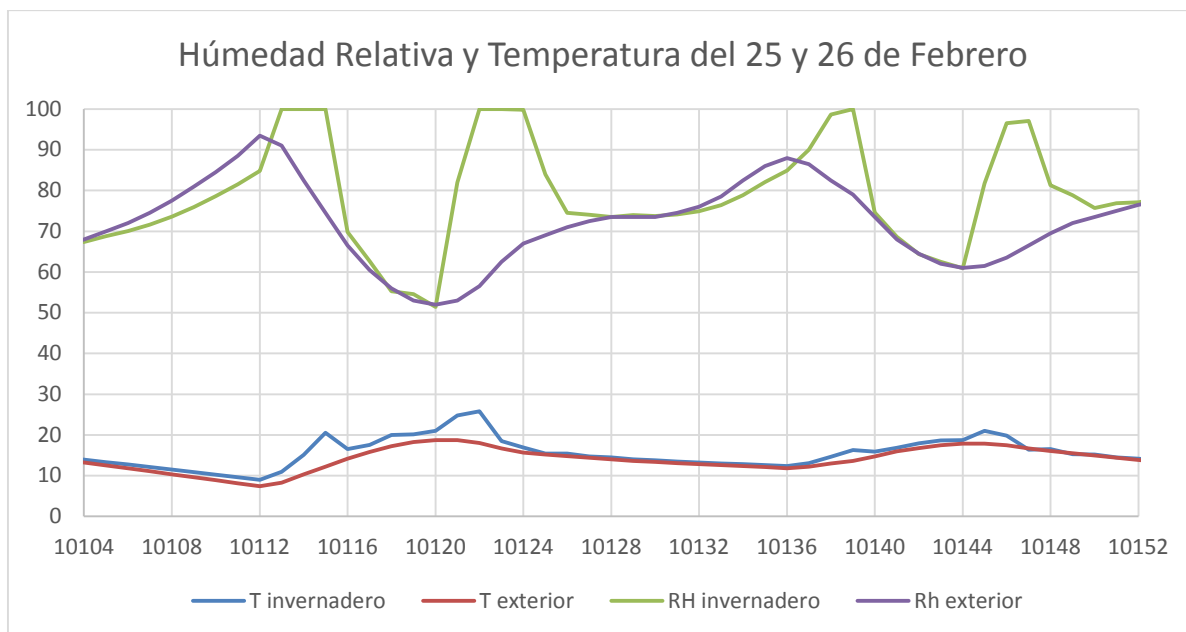


Figura 82. RH y T de los días 25 y 26 de Febrero en el interior del invernadero y en el exterior para el Modelo 2.

Por lo que respecta a la humedad relativa, este cambio no aporta grandes diferencias. A continuación vemos en la tabla el número de horas anuales que se superan las condiciones óptimas y biológicas.

Tabla 34. Horas fuera de rango de temperatura óptima y de temperatura biológica con el invernadero hasta finales de Mayo y hasta finales de Junio para el Modelo 2.

Fechas simulación	5640-12384	5640-13104
Suma horas simulación	6744	7464
Horas T > 26°	368	525
Horas T > 30°	86	93
Horas T < 12°	790	790
Horas T < 8°	25	25
Horas RH > 80	2937	3166
Horas RH < 40	0	0

Podemos ver que hemos reducido las horas en las que pasábamos de 26 y 30 grados, en 7 horas. También se aumenta en 9 las horas que se baja de 12°C, aunque las horas que se baja de 8°C siguen siendo las mismas. Añadir que aumentamos las horas que pasamos del 80% de RH, aunque esta variación no la consideramos significativa.

2.3 Modelo 3

En este caso, realizamos una variación sobre las tasas de infiltración a utilizar para ayudar a los futuros sistemas de climatización a instalar. En este caso programamos el invernadero para que, independientemente de la hora o estación del año, cuando la temperatura interior baje de 12°C, se cierren las ventanas, reduciendo la tasa de infiltración de 31.4 (ventanas abiertas) a 1 (perdidas con ventanas cerradas).

Esta variación se realiza para evitar pérdidas de calor cuando sea necesario aumentar la temperatura interior del invernadero. Si deseásemos calentar este con las ventanas abiertas, tendríamos una baja eficiencia, desperdiciando el aporte de calor de nuestros equipos.

Para el caso en que las temperaturas pasen de 30°C no cerraremos las ventanas, porque aunque el intercambiador tierra aire pueda aportar aire frío, aumentaría el “efecto invernadero”, acumulándose más calor del que podríamos disipar con el equipo (destacar que según información recibida por parte de los productores, en los meses de verano con el invernadero cerrado se llegan a pasar los 50°C).

Mostramos los perfiles de temperatura y RH.

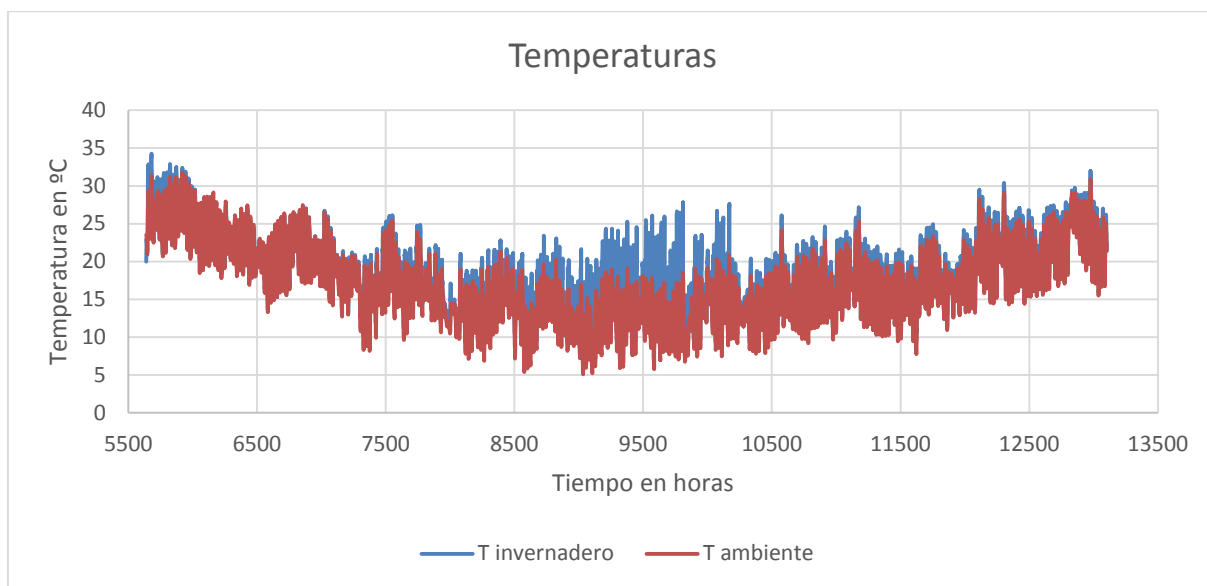


Figura 83. Gráfico con los perfiles de temperaturas en el interior y exterior del invernadero adelantando la fecha de blanqueo inicial y programando el cierre del invernadero.

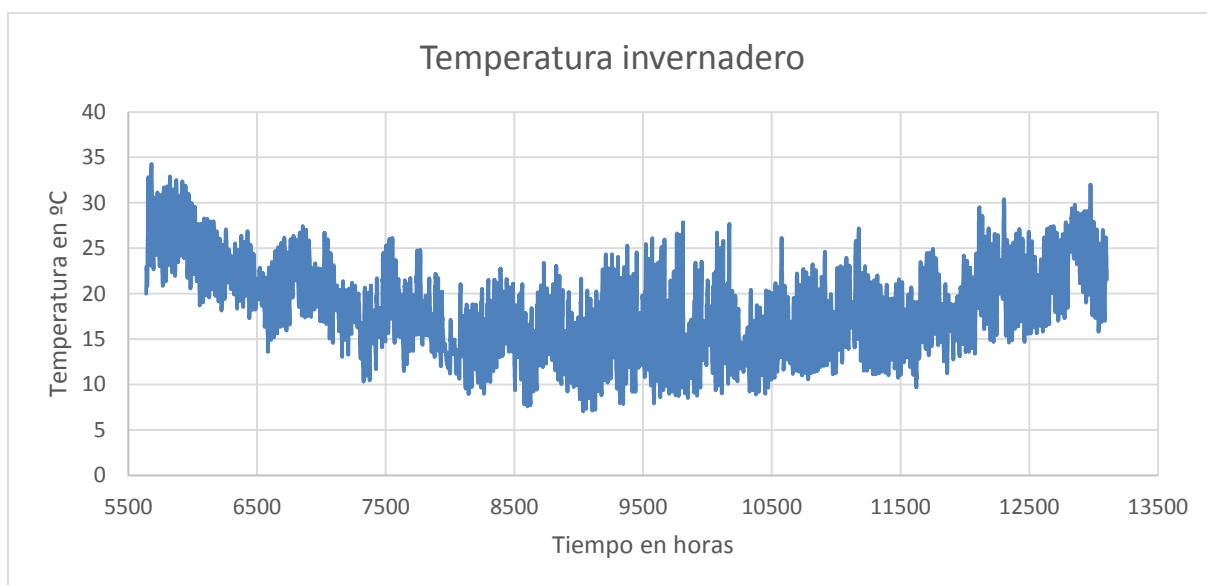


Figura 84. Gráfico con los perfiles de temperaturas en el interior del invernadero adelantando la fecha de blanqueo y programando el cierre del invernadero.

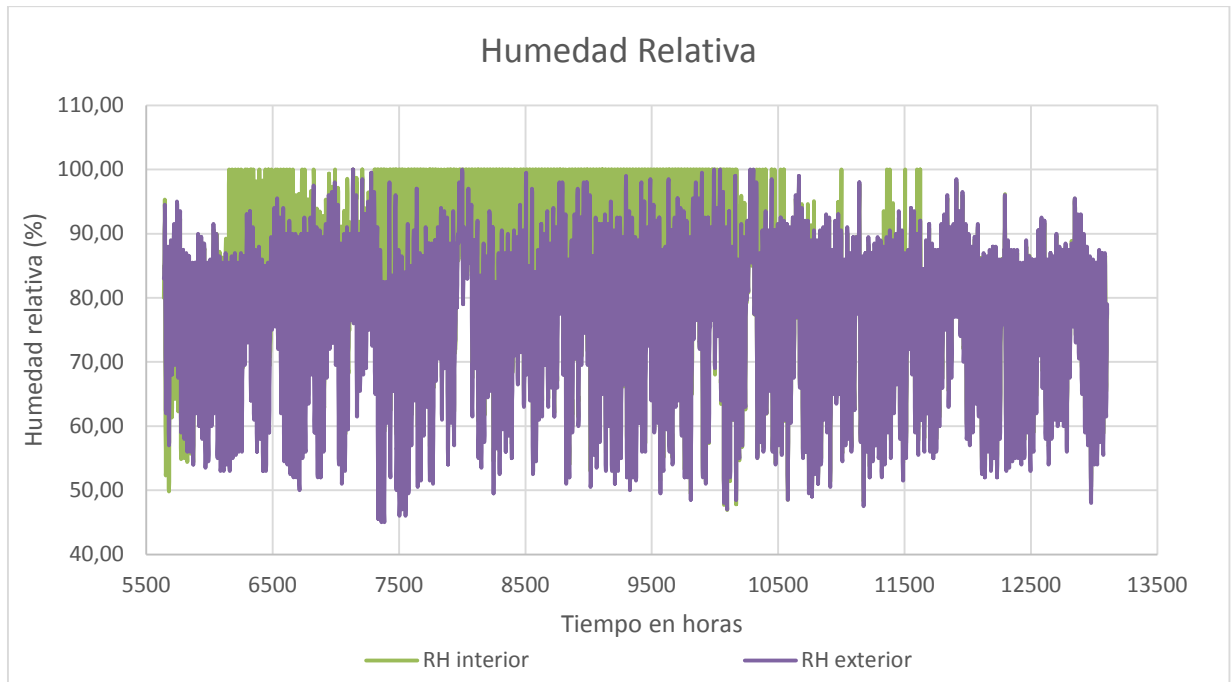


Figura 85. Gráfico con los perfiles de humedad relativa en el interior y exterior del invernadero adelantando la fecha de blanqueo y programando el cierre del invernadero.

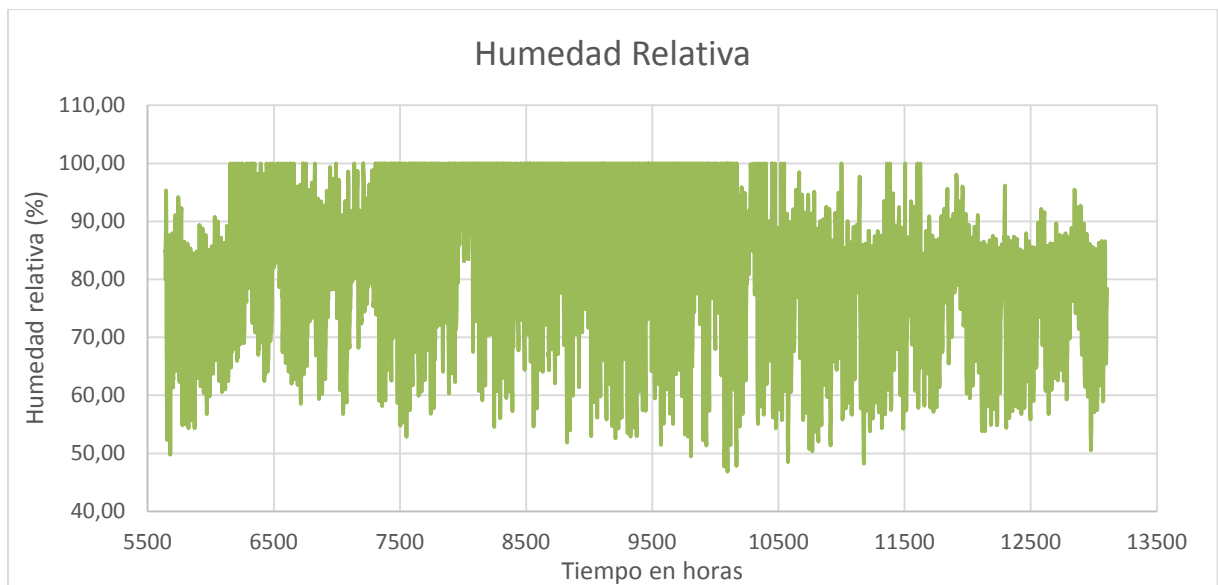


Figura 86. Gráfico con los perfiles de humedad relativa en el interior y del invernadero adelantando la fecha de blanqueo y programando el cierre del invernadero.

A continuación mostramos la evolución de la humedad relativa y las temperaturas en este tercer modelo para los días 25 y 26 de febrero.

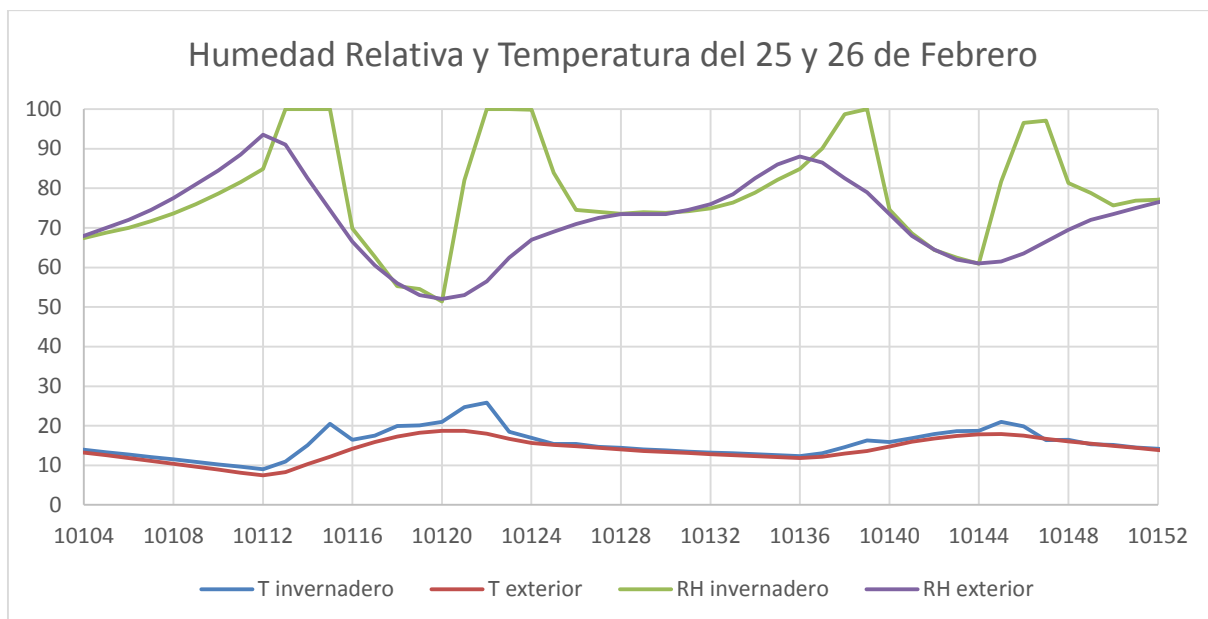


Figura 87. RH y T de los días 25 y 26 de Febrero en el interior del invernadero y en el exterior para el Modelo 3.

En este caso, como las horas en las que bajamos de 12°C ya coinciden con las que estaban previamente establecidas para tener el invernadero cerrado, no observamos diferencias respecto al modelo anterior.

Pese a ello, en la siguiente tabla en la que resumimos la información más significativa de la simulación para todo el año, podemos ver las diferencias de un modelo al otro.

Tabla 35. Horas fuera de rango de temperatura óptima y de temperatura biológica con el invernadero hasta finales de Mayo y hasta finales de Junio para el Modelo 3.

Fechas simulación	5640-12384	5640-13104
Suma horas simulación	6744	7464
Horas T > 26°	368	525
Horas T > 30°	86	93
Horas T < 12°	777	777
Horas T < 8°	24	24
Horas RH > 80	2921	3150
Horas RH < 40	0	0

Observamos que al programar el cierre de las ventanas, las horas que estamos por debajo de 12°C descienden de 790 a 777. Además reducimos una hora las que estamos por debajo de 8°C, pasando de 25 a 24. Repetir, que en este caso no nos interesan tanto los resultados que obtenemos ahora mismo, sino las ventajas que nos aportará este nuevo modelo a la hora de climatizar el invernadero.

3 Análisis de los diversos modelos

A continuación se comparan los resultados obtenidos para los 3 modelos realizados. Mostraremos dos comparaciones, hasta la hora 12384 (31 de Mayo) y hasta 13104 (30 de Junio)

Tabla 36. Tabla comparativa con temperaturas y humedades relativas de los diversos modelos del 23 de Agosto al 31 de Mayo.

Fechas simulación (h)	5640-12384		
Modelo	1	2	3
Suma horas simulación	6744	6744	6744
Horas T> 26º	385	368	368
Horas T> 30º	93	86	86
Horas T< 12º	779	790	777
Horas T< 8º	25	25	24
Horas RH>80	2934	2937	2921
Horas RH<40	0	0	0

Tabla 37. Tabla comparativa con temperaturas y humedades relativas de los diversos modelos del 23 de Agosto al 30 de Junio.

Fechas simulación (h)	5640-13104		
Modelo	1	2	3
Suma horas simulación	7464	7464	7464
Horas T> 26º	542	525	525
Horas T> 30º	100	93	93
Horas T< 12º	779	790	777
Horas T< 8º	25	25	24
Horas RH>80	3163	3166	3150
Horas RH<40	0	0	0

Comprobamos como el modelo 3, el cual recibe la variación sobre las fechas, adelantándolo dos semanas sobre las inicialmente establecidas, y el cierre de ventanas automáticas cuando las temperaturas bajan de 12º, reduce las horas por debajo de 12º y por encima de 30º. Además, el cierre de las ventanas que se realiza, ayudará a la futura climatización mediante equipos que realicemos, evitando que el calor que aportemos al sistema se escape de nuestro invernadero.

Álvaro Rodríguez Almaraz

**Sistemas de climatización de bajo impacto ambiental
para invernaderos**

**Trabajo Fin de Máster
dirigido por el Dr. Joan Manel Vallès Rasquera**

Máster en Ingeniería Industrial

Anexo 2. Justificaciones del modelo con EAHE



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2017

Índice del anexo de justificaciones del EAHE

1	Hipótesis y consideraciones del EAHE	2
2	Parámetros de los tubos seleccionados	4
2.1	Disposición seleccionada	4
2.2	Tipo de tubo seleccionado.....	5
2.2.1	Tubos para verano e invierno.....	5
2.2.2	Tubos solo para invierno	6
2.2.3	Elementos auxiliares	6
2.3	Profundidad del terreno	7
2.4	Cálculo ΔP del ventilador.....	9
3	Modelos considerados con el EAHE.....	11
3.1	Modelo 1. 38 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.25m con velocidad 5m/s 11	
3.2	Modelo 2. 23 tubos de 38 metros de longitud y diámetro 0.25m con velocidad 5m/s 13	
3.3	Modelo 3. 38 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.25m con velocidad 1m/s 15	
3.4	Modelo 4. 23 tubos de 38 metros de longitud y diámetro 0.25m con velocidad 1m/s 16	
3.5	Modelo 5. 15 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.63m con velocidad 3m/s 17	
3.6	Modelo 6. 4 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.63m con velocidad 5m/s 20	
3.7	Modelo 7. 8 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.63m con velocidad 5m/s 22	
3.8	Modelo 8. 8 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.63m con velocidad 4m/s 23	
3.9	Modelo 9. 8 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.63m con velocidad 3m/s 25	
4	Análisis de los diversos modelos.....	27

1 Hipótesis y consideraciones del EAHE

Tal y como se ha comentado en la introducción, dentro de los intercambiadores de calor tierra-aire se pueden distinguir dos tipos básicos de equipos, de lazo abierto y de lazo cerrado. El primero bombea aire del exterior que hace pasar por intercambiador tierra-aire, mientras que el segundo recircula constantemente el aire interior. En nuestro caso, para conseguir la máxima estabilidad térmica interior, reducir la demanda de calor sensible y aprovechar el aislamiento del invernadero se opta por uno de lazo cerrado.

En la siguiente imagen se muestra una aproximación del tipo de instalación que se implementaría.

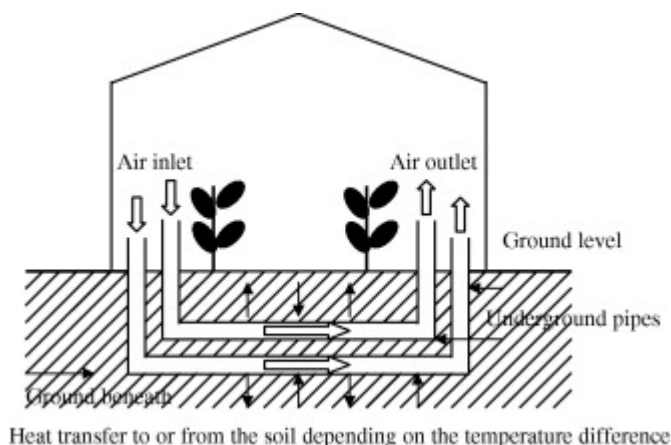


Figura 88. Esquema funcionamiento EAHE lazo cerrado en un invernadero [14].

Como base para el cálculo de estos equipos se parte del hecho probado de que la temperatura del suelo según aumenta la profundidad disminuye su variación a lo largo del año. En algunas localidades puede llegar a considerarse constante a lo largo del año a partir de una profundidad de 1.5 a 2 metros [15], y es igual a la temperatura ambiente media de la localización, aunque en los climas más extremos deben buscarse mayores profundidades, teniendo que llegar hasta 10 metros de profundidad para conseguir temperaturas constantes (en estos climas más extremos encontramos un pequeño ΔT de máximo 5°C , en 2 metros).

Además para el cálculo del EAHE se toman las siguientes hipótesis [15, 16]:

1. El valor de la humedad relativa no varía con la altura [18].
2. El calor específico de las plantas que se asume es el del agua [17, 18].
3. La capacidad calorífica del aire interior del invernadero es despreciada [17, 18].
4. El flujo de aire es uniforme a lo largo de los tubos [19, 20].
5. No hay intercambio de calor por radiación entre los tubos [22, 25].
6. La extracción de calor no afecta a la distribución de temperaturas del suelo [19].
7. La profundidad de la instalación es constante a lo largo de la zanja [20].
8. La tierra que rodea el tubo se considera isotrópica, con conductividad térmica homogénea en todo el estrato [16].
9. La resistencia térmica del material del tubo es despreciable [16].
10. El tubo es de sección circular uniforme [16].
11. El efecto térmico del terreno que rodea el tubo es despreciable después de una distancia "r" de la parte exterior del tubo, donde "r" es el radio de la tubería [16].
12. No hay evaporación o congelación del suelo; vapor y aire en los espacios porosos se asumen que son gases ideales [16, 23].
13. La presión del suelo se considera atmosférica [20].

14. El perfil de temperaturas en los tubos colindantes no es afectada por la presencia de otros tubos. Como resultado, la temperatura superficial del tubo es uniforme en la dirección axial [26].
15. Se asume radiación solar aportada por el año típico de Trnsys para la región de Almería.
16. Posibles cambios de calor latente no son tenidos en cuenta, lo que significa que no se considera infiltración de agua y que la temperatura del aire se supone que se mantiene superior al punto de rocío [23, 24].

Recordamos los parámetros que determinan el dimensionado del intercambiador tierra-aire son:

- Caudal volumétrico de aire
- Profundidad de montaje
- Material del tubo
- Número de tubos
- Número de capas de tubos
- Longitud de los tubos
- Valores característicos del subsuelo
- Clima en el emplazamiento de la instalación

En el caso de los valores característicos del suelo y el clima del emplazamiento, son nuestras condiciones de partida, a partir de las cuales se debe trabajar.

El material del tubo no es significativo dado que la resistencia térmica es despreciable al ser tubo de bajo espesor, aunque se utilizará el valor típico del material más habitual en los catálogos de tubos.

Respecto a las hipótesis anteriormente consideradas, en algunos puntos Trnsys es más exigente, demandándonos más datos, y más valores que varíen a lo largo del año en vez de constantes como se comentaba anteriormente. También nos obliga a realizar una mayor separación entre tubos (4 veces el diámetro). Pese a que la temperatura del suelo pueda ser considerada uniforme según algunas de las hipótesis citadas, Trnsys permite calcular la variación de temperatura del suelo a lo largo del año para una profundidad determinada. Considerar esta variación a lo largo del año, provoca una pérdida de eficiencia del EAHE respecto a una temperatura fija para todo el año, dado que la diferencia de temperaturas entre el aire de entrada y la temperatura del suelo es menor.

Los valores que podemos utilizar para variar la capacidad del equipo son caudal, número de tubo y longitud de estos. Partiendo de las publicaciones previas, diversos de los artículos ya citados hacen referencia a tubos con diámetro interior de 15cm de espesor con velocidades de 2 a 5 m/s [27, 28] Otros en cambio realizan el dimensionado del equipo con tubos de más diámetro (25cm) y caudales inferiores (0.7 m/s) [16].

Generalmente se aconseja el rango de velocidades de 1 a 5m/s dado que por una parte se asegura un flujo turbulento, y por otra se garantiza un cierto periodo de permanencia que permite el intercambio de calor entre el aire aspirado y el subsuelo. Además, velocidades superiores a 6m/s provocan ruidos.

Por último, se considerará la construcción del equipo en 1 o 2 capas en función de las necesidades de calor a intercambiar y de la eficiencia del sistema, intentando que tan solo con el EAHE se pueda satisfacer toda la demanda energética.

2 Parámetros de los tubos seleccionados

2.1 Disposición seleccionada

Pese a que un aumento de la longitud de los tubos comporta una mayor superficie de intercambio y por tanto, mayor aporte energético, generalmente se utilizan longitudes de tubos no superiores a 60 metros. Por encima de esta longitud tenemos grandes pérdidas de presión y el sistema pierde eficiencia.

En nuestro caso se pretende ocupar toda la superficie que ocupa el invernadero (23.2·38) con tubos. El único parámetro a respetar será la separación entre tubos, donde Trnsys es más exigente que las hipótesis que hemos comentado anteriormente, y exige una separación de 4 veces el diámetro entre ejes de tubos para evitar sobrecalentamiento del suelo e intercambio de calor entre tubos. Por ello se toman en cuenta las dos disposiciones posibles. Tubos longitudinales y tubos transversales. En el primero de los casos se dispondrán tubos en paralelo hasta ocupar un ancho de 23.2 metros y su longitud no deberá superar los 38 metros de largo (disposición 1). En el segundo de los casos los tubos irían girados 90° y estarían dispuestos en paralelo en la cara de 38 metros del invernadero, sin superar el fondo de este, de 23.2 metros (disposición 2).

Realizando un sencillo cálculo comprobamos la opción que proporciona mayor área de intercambio.

Partiendo de una suposición de tubos de diámetro nominal 250, de los más utilizados en este tipo de instalaciones, obtenemos:

Tabla 38. Parámetros básicos tubos DN250.

Disposición	1	2
Largo invernadero (m)	23.2	38
Ancho invernadero (m)	38	23.2
Ø interior tubo (m)	0.2324	0.2324
Ø exterior tubo (m)	0.250	0.250
Perímetro tubo (m)	0.7578	0.7578
Separación mínima entre tubos (m)	1.00	1.00
Longitud máxima tubo (m)	23	38
Nº máximo de tubos	38	23
Nº máximo entero de tubos por capa	38	23
Área de intercambio (m ²) por capa	662.28	662.28

También se estudiará la posibilidad de utilizar tubos de diámetro 630, la serie más grande, en función de los primeros resultados de simulación.

Tabla 39. Parámetros básicos tubos DN630.

Disposición	1	2
Largo invernadero (m)	23.2	38
Ancho invernadero (m)	38	23.2

Ø interior tubo (m)	0.5824	0.5824
Ø exterior tubo (m)	0.630	0.630
Perímetro tubo (m)	1.9792	1.9792
Separación mínima entre tubos (m)	2.52	2.52
Longitud máxima tubo (m)	23	38
Nº máximo de tubos	15.079	9.206
Nº máximo entero de tubos por capa	15	9
Área de intercambio (m²)	631.23	625.745

Obtenemos un área de intercambio igual o superior en la distribución 1, donde se busca colocar más tubos. Esta relación se mantiene para todos los diámetros priorizando colocar el número máximo de tubos. Además destacar que para grandes diámetros, al colocar pocos tubos y tener que cumplir el requisito de separación mínima, el redondeo nos dificulta la disposición 2. Otro punto a tener en cuenta es que mediante la distribución 1 se consigue que el aporte de calor se reparta de forma más homogénea, debido a la menor distancia entre la aspiración y la impulsión.

Destacar también que como la diferencia de temperaturas entre la temperatura de entrada y la temperatura del terreno no tiende a superar los 10 grados, no es necesario tampoco grandes longitudes de tubos (con aproximadamente 20 metros de tubo el ΔT entre el terreno y el fluido será de aproximadamente 1°C).

2.2 Tipo de tubo seleccionado

2.2.1 Tubos para verano e invierno

Nos decantamos por tubos de Polipropileno con tratamiento antimicrobiano que encontramos en la gama AWADUKT Thermo del fabricante REHAU, especializado en instalaciones de intercambiadores tierra aire para grandes edificios industriales. Estos tubos llevan un tratamiento antibacteriano, dado que en verano, al tener menores temperaturas en el tubo que en el aire exterior, puede producirse condensación que favorezca la aparición de bacterias. Esto provoca un gran encarecimiento de los costes fijos de la instalación.

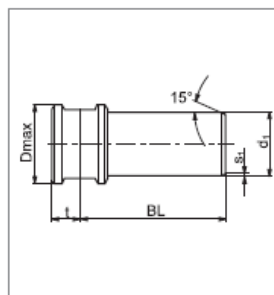
Tubo AWADUKT Thermo

Con copa y sistema de estanqueización de seguridad, extremos de los tubos provistos de capuchones antipolvo.

Antimicrobiano

Material: RAU-PP 2387/2400

Color: Marrón anaranjado



Artículo	Var	DN/OD	BL [mm]	d1 [mm]	Dmax [mm]	t [mm]	s1 [mm]	Peso [kg/ud]	Unidades por palet
170791	001	250	1000	250	296	135	8,8	6,7	12
170801	001	250	3000	250	296	135	8,8	6,7	12
170971	001	250	6000	250	296	135	8,8	6,7	12
170821	001	315	1000	315	365	145	11,1	10,6	9
170831	001	315	3000	315	365	145	11,1	10,6	9
170981	001	315	6000	315	365	145	11,1	10,6	9
170851	002	400	6000	400	470	170	13,5	16,0	6
170861	003	500	6000	500	570	195	17,0	25,3	2

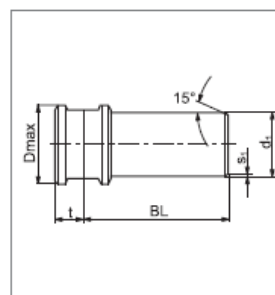
Figura 89. Tubos AWADUKT Thermo DN250-500

Tubo L-EWT DN 630

Con copa y sistema de estanqueización de seguridad, extremos de los tubos provistos de capuchones antipolvo.

Material: RAU-PP 2300

Color: Marrón anaranjado



Artículo	Var	DN/OD	BL [mm]	d1 [mm]	Dmax [mm]	t [mm]	s1 [mm]	Peso [kg/ud]	Unidades por palet
352908	001	630	6000	630	710	220	23,8	46,7	2

Figura 90. Tubos AWADUKT Thermo DN630.

2.2.2 Tubos solo para invierno

En caso de solo utilizar la instalación para calentar aire durante invierno, se podría optar por unos tubos sin ningún tratamiento para abaratar la instalación.

2.2.3 Elementos auxiliares

El aire entrara por una torre de aspiración que manda el flujo a un colector desde donde enviamos el caudal a cada uno de los tubos restantes. Consideramos que el caudal que pasa por cada tubo es igual.



Figura 91. Colector con tubos.

En el caso de que la instalación trabaje durante todo el año debe instalarse una descarga de condensados y un sifón para la descarga de estos, para evitar la acumulación de agua en el interior de los tubos.

Además, debe calcularse la caída de presión y el caudal a utilizar para decidir la potencia mínima necesaria del ventilador a escoger.

2.3 Profundidad del terreno

Uno de los elementos básicos que nos limitará las temperaturas que podamos conseguir para el aire a su salida del EAHE es la temperatura del suelo. En este caso, no la suponemos constante, sino que está va fluctuando a lo largo del año.

Trnsys dispone de un Type (Type 77), el cual nos permite calcular la temperatura del suelo a diferentes profundidades en función de las características del terreno. Este Type funciona mediante la expresión de Kusuda.

$$T(z, t) = T_m - A_s e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos \left(\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \cdot \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right) \quad (1)$$

Donde T_m es la temperatura media del suelo (a una profundidad donde no son perceptibles las variaciones de temperatura, y que se considera igual a la temperatura media ambiente), z la profundidad de las tuberías, t el día del que queremos conocer la temperatura, t_0 el día de menor temperatura superficial, α es la difusividad térmica del suelo en $\text{m}^2/\text{día}$ y A_s es la oscilación de la temperatura superficial.

Este ecuación supone la temperatura del suelo como una función sinusoidal, cuya amplitud varía en función de la profundidad (a más profundidad, menor amplitud), y desplazada en función del día de menor temperatura de la superficie del terreno.

A continuación mostramos una imagen de una muestra de suelo a diversas profundidades de Valencia, donde podemos ver que realmente la evolución que sigue la temperatura del suelo sigue la tendencia que marca esta expresión.

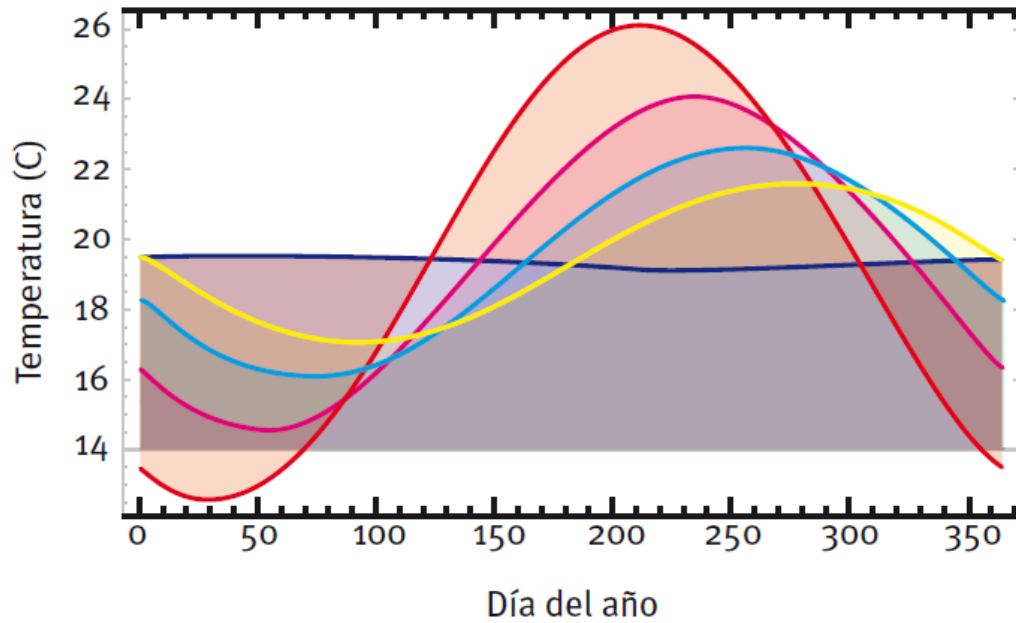


Figura 92. Perfiles de temperatura del suelo de la ciudad de Valencia [29].

La curva de color rojo corresponde a la oscilación natural (inmediatamente bajo la superficie), en magenta, azul claro, amarillo y azul oscuro se representan sucesivamente las evoluciones de temperatura a 1 m, 2 m, 3 m y 10 m respectivamente.

En esta imagen vemos, en color rojo, la oscilación de la temperatura superficial, la cual para este caso (Valencia), está entre 13 y 14°C. Este valor concuerda con la diferencia entre la temperatura máxima y mínima media mensual.

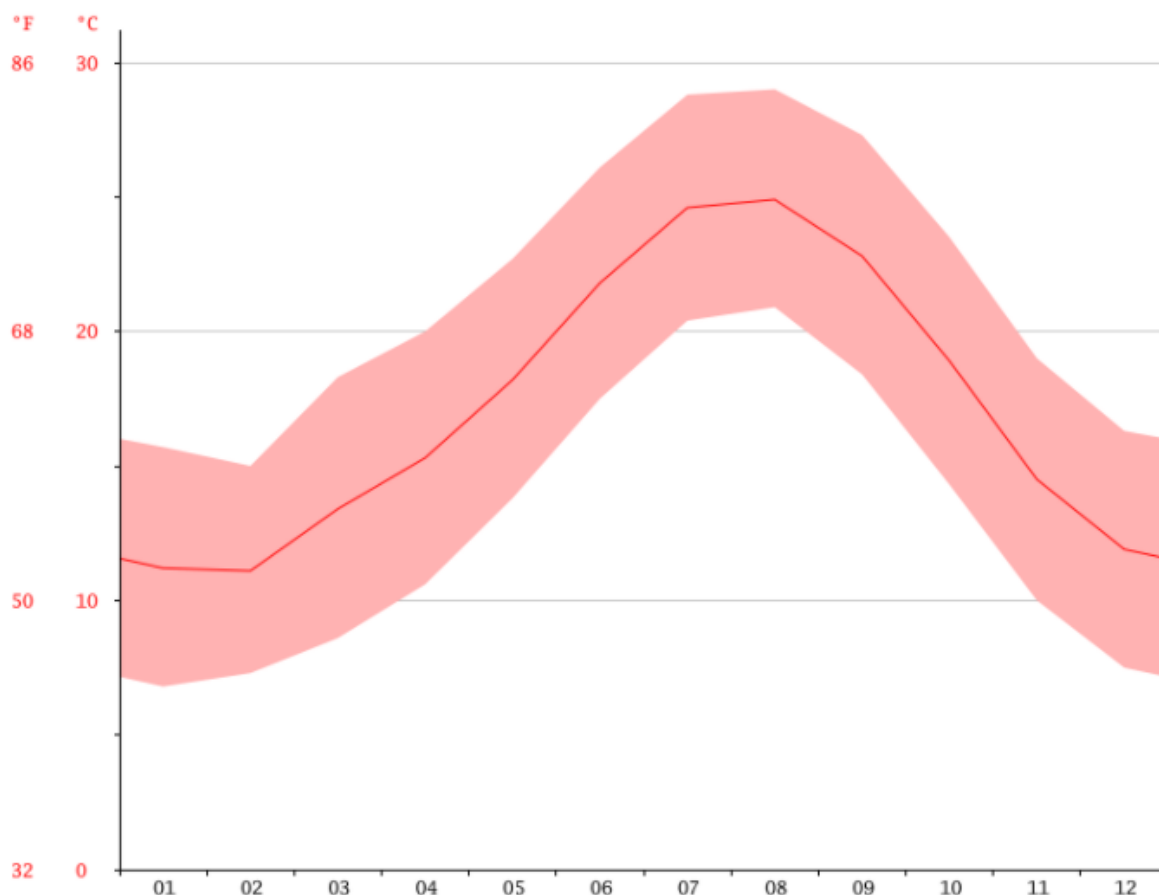


Figura 93. Clima año típico Valencia. Fuente: Climate-date.org

En este gráfico se muestran las temperaturas medias de Valencia en un año típico para cada mes, teniendo en agosto la máxima, de 24.9°C y en febrero la mínima, con 11.1°C. Si hacemos la diferencia vemos que el incremento de temperatura es de 13.8°C, encajando con la amplitud que se observa en el suelo.

Por tanto, para nuestro caso deberemos calcular la oscilación de la temperatura superficial que tengamos en el interior del invernadero para las condiciones exigidas, aunque también deberemos considerar la variación en el exterior, dado que se produce una conductividad entre el suelo de dentro y el de fuera.

Para el terreno de fuera del invernadero, utilizamos los valores de Trnsys, de 26°C en Agosto y 12.4 en Enero, teniendo una oscilación de 13.6°C.

Destacar que normalmente, debido a los costes de excavación y a la poca ganancia que supone hacer instalaciones más profundas, se tiende a instalar los tubos del EAHE a 2 metros de profundidad. En caso de poner dos capas de tubos, se colocan a 2 y 3 metros de profundidad.

2.4 Cálculo ΔP del ventilador

Para buscar el tipo de ventilador adecuado, deberemos seleccionarlo en función del caudal y del ΔP que deba aportar. Para ello se calcularán las pérdidas de carga que tiene la instalación.

Se debe tener en cuenta los diámetros, longitud y número de tubos y los accesorios que tiene la instalación, tales como codos y bifurcaciones. Además, el parámetro que provocará

mayores diferencias en el diseño de la instalación es el caudal y por consiguiente, la velocidad dentro de los tubos.

Destacar que en el caso de dos capas, el caudal de aire necesario para obtener las velocidades deseadas se doblará, aumentando a más del doble la caída de presión, dado que aparte de la caída de presión en los tubos, en el primer tramo vertical del colector la velocidad será superior al caso anterior, comportando mayores pérdidas que en el caso de una capa.

3 Modelos considerados con el EAHE

3.1 Modelo 1. 38 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.25m con velocidad 5m/s

Para esta disposición requerimos un caudal total de 37500 kg/h. Al repartir el caudal por 4 equipos, cada uno de ellos tiene un caudal de 9375 kg/h ($7250\text{m}^3/\text{h}$), obteniendo una caída de presión de 481 Pascales en cada uno de ellos.

Buscamos ventiladores en el catálogo de Soler & Palau en función de estos parámetros. En este caso, al tener alto caudal y una elevada caída de presión, necesitaremos buscar dentro de los ventiladores centrífugos. Se considera que el más adecuado para nuestras características es el modelo CBP-10/10 [36]. A continuación se muestra sus curvas características con el punto de operación en el que nos encontramos.

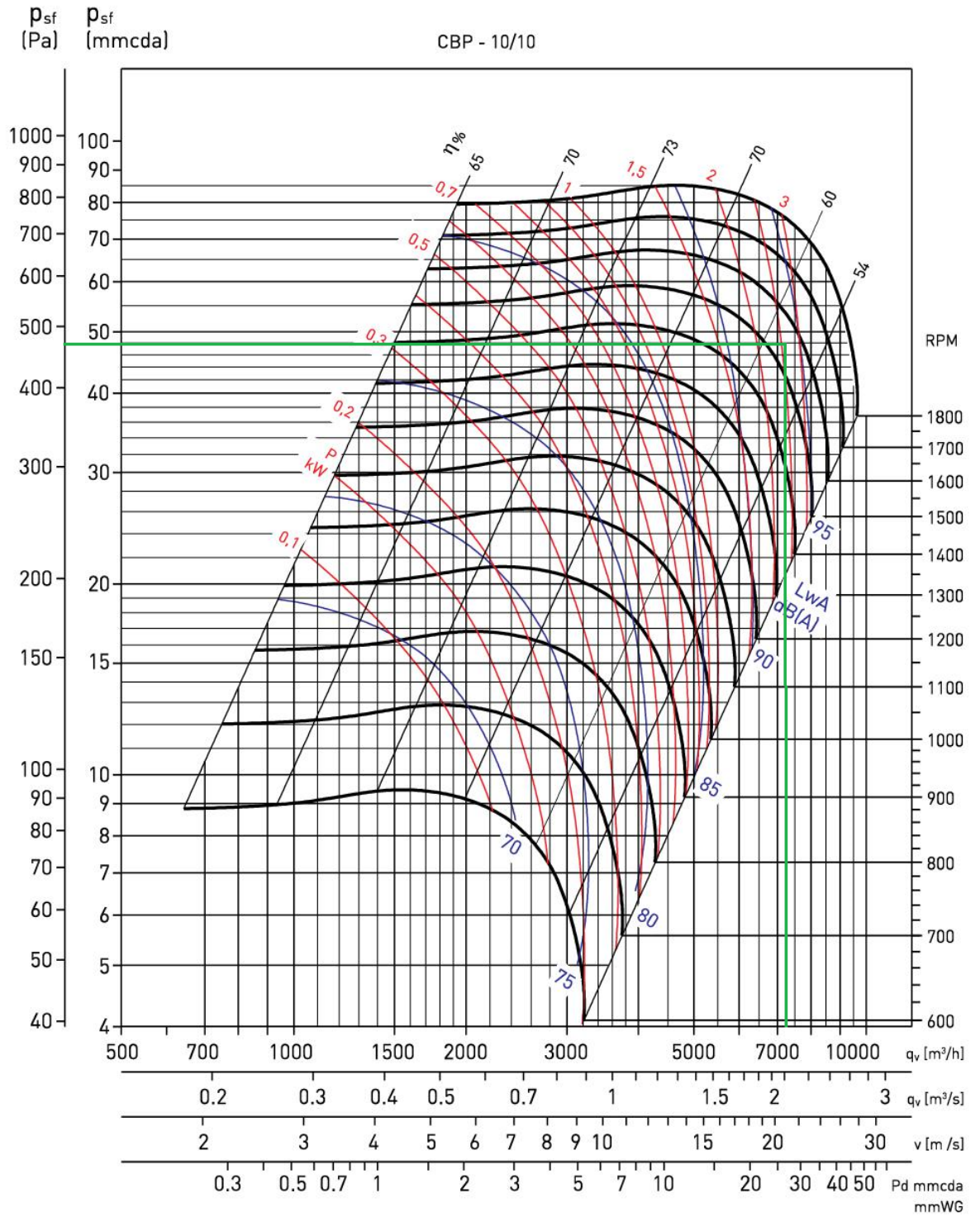


Figura 94. Curva ventilador CBP-10/10 y punto de operación.

- Presión: 481 Pa
- Caudal: 7250 m^3/h
- Rendimiento: 0.58
- Potencia: 2.6 kW

Obtenemos los siguientes resultados, que mostramos comparados con la situación previa a la instalación del equipo:

Tabla 40. Resultados Modelo 1.

Fechas simulación	EAHE 38t(25)-23m; v=5m/s		Sin EAHE	
	5640-12384	5640-13104	5640-12384	5640-13104
Horas T> 26º	368	525	368	525
Horas T> 28º	167	212	171	218
Horas T> 30º	76	81	86	93
Horas T< 12º	572	572	777	777
Horas T< 11º	67	67	408	408
Horas T< 10º	9	9	196	196
Horas T< 9º	0	0	70	70
Horas T< 8º	0	0	24	24
Horas RH>80	3057	3285	2921	3150
Horas RH<40	0	0	0	0

Observamos que cumplimos el requisito de no bajar nunca por debajo de los 8°C, además de un descenso de 205 horas por debajo de los 12°C. Añadir que tenemos un ascenso de un 5% en las horas por encima de una humedad relativa del 80% que no consideramos significativo. Este aspecto se reproducirá en todos los casos, pero los aumentos que encontraremos los consideraremos despreciables.

3.2 Modelo 2. 23 tubos de 38 metros de longitud y diámetro 0.25m con velocidad 5m/s

Para esta disposición requerimos un caudal total de 22500 kg/h. Al repartir el caudal por 4 equipos, cada uno de ellos tiene un caudal de 5625 kg/h (4350m³/h), obteniendo una caída de presión de 424 Pascales en cada uno de ellos.

Buscamos ventiladores en el catálogo de Soler & Palau en función de estos parámetros. En este caso, al tener alto caudal y una elevada caída de presión, necesitaremos buscar dentro de los ventiladores centrífugos. Se considera que el más adecuado para nuestras características es el modelo CBP-10/8 [36]. A continuación se muestra sus curvas características con el punto de operación en el que nos encontramos.

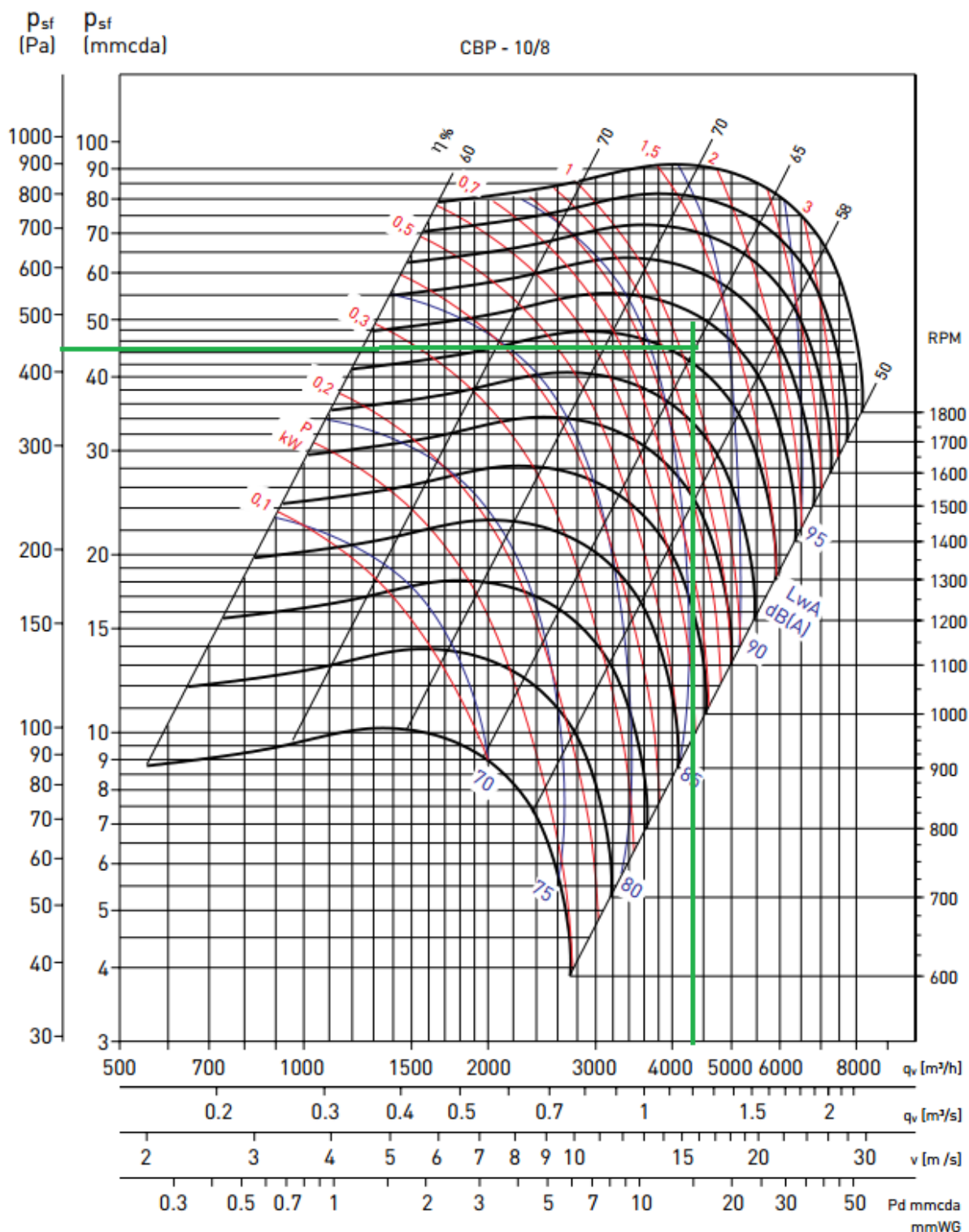


Figura 95. Curva ventilador CBP-10/8 y punto de operación.

- Presión: 424 Pa
- Caudal: 4350 m^3/h
- Rendimiento: 0.65
- Potencia: 1.1 kW

Obtenemos los siguientes resultados, que mostramos comparados con la situación previa a la instalación del equipo:

Tabla 41. Resultados Modelo 2.

Fechas simulación	EAHE 23t(25)·38m; v=5m/s		Sin EAHE	
	5640-12384	5640-13104	5640-12384	5640-13104
Horas T> 26º	368	525	368	525
Horas T> 28º	165	210	171	218
Horas T> 30º	72	77	86	93
Horas T< 12º	632	632	777	777
Horas T< 11º	117	117	408	408
Horas T< 10º	19	19	196	196
Horas T< 9º	0	0	70	70
Horas T< 8º	0	0	24	24
Horas RH>80	3063	3292	2921	3150
Horas RH<40	0	0	0	0

3.3 Modelo 3. 38 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.25m con velocidad 1m/s

Para esta disposición requerimos un caudal total de 7500 kg/h. Al repartir el caudal por 4 equipos, cada uno de ellos tiene un caudal de 1875 kg/h (1450m³/h), obteniendo una caída de presión de 24.1 Pascales en cada uno de ellos.

Buscamos ventiladores en el catálogo de Soler & Palau en función de estos parámetros. En este caso, al tener un caudal más bajo y una caída de presión también muy reducida, utilizaremos ventiladores murales. Se considera que el más adecuado para nuestras características es el modelo HXM-350 [37]. A continuación se muestra sus curvas características con el punto de operación en el que nos encontramos.

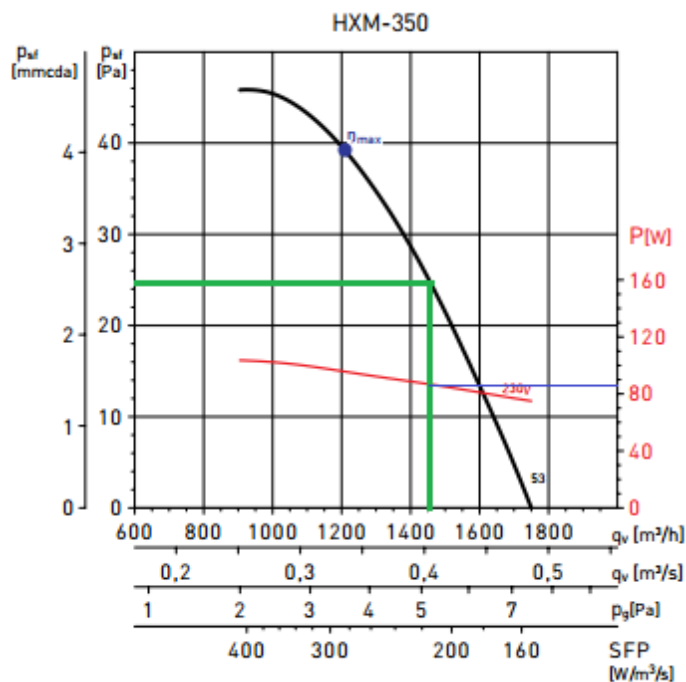


Figura 96. Curva ventilador HXM-350 y punto de operación.

- Presión: 24.1 Pa

- Caudal: 1450 m³/h
- Rendimiento: 0.12
- Potencia: 0.085 kW

Obtenemos los siguientes resultados, que mostramos comparados con la situación previa a la instalación del equipo:

Tabla 42. Resultados Modelo 3.

Fechas simulación	EAHE 38t(25)·23m; v=1m/s		Sin EAHE	
	5640-12384	5640-13104	5640-12384	5640-13104
Horas T> 26º	367	524	368	525
Horas T> 28º	165	211	171	218
Horas T> 30º	78	84	86	93
Horas T< 12º	745	745	777	777
Horas T< 11º	237	237	408	408
Horas T< 10º	77	77	196	196
Horas T< 9º	16	16	70	70
Horas T< 8º	0	0	24	24
Horas RH>80	3062	3291	2921	3150
Horas RH<40	0	0	0	0

3.4 Modelo 4. 23 tubos de 38 metros de longitud y diámetro 0.25m con velocidad 1m/s

Para esta disposición requerimos un caudal total de 5000 kg/h. Al repartir el caudal por 4 equipos, cada uno de ellos tiene un caudal de 1250 kg/h (967m³/h), obteniendo una caída de presión de 20 Pascales en cada uno de ellos.

Buscamos ventiladores en el catálogo de Soler & Palau en función de estos parámetros. En este caso, al tener un caudal bajo caudal y una caída de presión también muy reducida, utilizaremos ventiladores murales. Se considera que el más adecuado para nuestras características es el modelo HCBB/4-250/H [38]. A continuación se muestra sus curvas características con el punto de operación en el que nos encontramos.

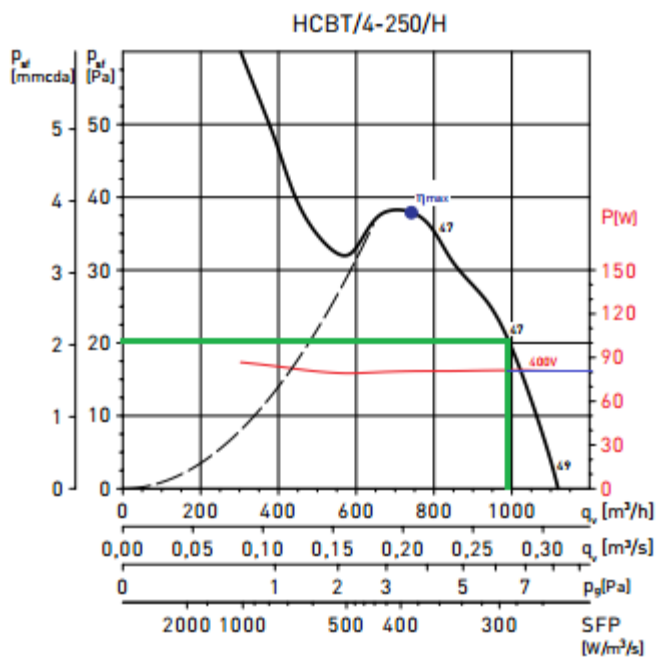


Figura 97. Curva ventilador HCBT/4-250/H y punto de operación.

- Presión: 20 Pa
- Caudal: 966 m³/h
- Rendimiento: 0.065
- Potencia: 0.080 kW

Obtenemos los siguientes resultados, que mostramos comparados con la situación previa a la instalación del equipo:

Tabla 43. Resultados Modelo 4.

Fechas simulación	EAHE 23t(25)-38m; v=1m/s		Sin EAHE	
	5640-12384	5640-13104	5640-12384	5640-13104
Horas T > 26º	367	524	368	525
Horas T > 28º	168	214	171	218
Horas T > 30º	82	88	86	93
Horas T < 12º	753	753	777	777
Horas T < 11º	258	258	408	408
Horas T < 10º	89	89	196	196
Horas T < 9º	21	21	70	70
Horas T < 8º	0	0	24	24
Horas RH > 80	3058	3287	2921	3150
Horas RH < 40	0	0	0	0

3.5 Modelo 5. 15 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.63m con velocidad 3m/s

Tras obtener en todas las configuraciones con tubos de diámetro 0.25 m temperaturas superiores a los 8°C, decidimos reducir el número de tubos y aumentar el diámetro de estos

para reducir los costes fijos en la construcción del equipo. Por ello decidimos probar tubos de 0.63m de diámetro, el mayor diámetro que suministra el proveedor.

Para esta disposición requerimos un caudal total de 60000 kg/h. Al repartir el caudal por 4 equipos, cada uno de ellos tiene un caudal de 15000 kg/h ($11600\text{m}^3/\text{h}$), obteniendo una caída de presión de 150 Pascales en cada uno de ellos.

Buscamos ventiladores en el catálogo de Soler & Palau en función de estos parámetros. En este caso, al tener alto caudal, pese a que el incremento de presión solicitado no es excesivamente alto, optamos por ventiladores centrífugos. Se considera que el más adecuado para nuestras características es el modelo CBP-15/15 [36]. A continuación se muestra sus curvas características con el punto de operación en el que nos encontramos.

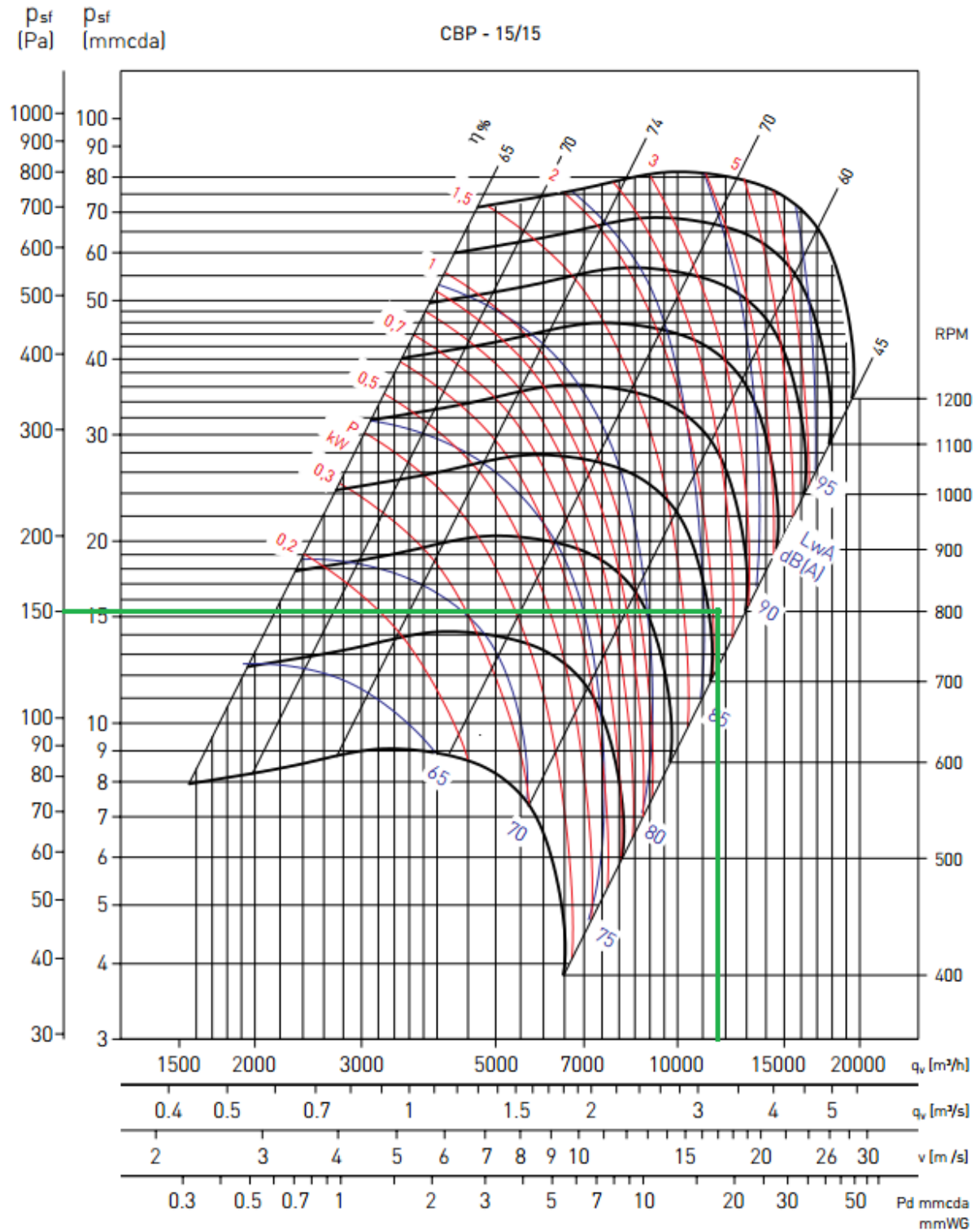


Figura 98. Curva ventilador CBP 15/15 y punto de operación.

- Presión: 150 Pa
- Caudal: 11600 m^3/h
- Rendimiento: 0.50
- Potencia: 2.1 kW

Obtenemos los siguientes resultados, que mostramos comparados con la situación previa a la instalación del equipo:

Tabla 44. Resultados Modelo 5.

Fechas simulación	EAHE 15t(63)-23m; v=3m/s		Sin EAHE	
	5640-12384	5640-13104	5640-12384	5640-13104
Horas T > 26º	368	525	368	525
Horas T > 28º	169	216	171	218
Horas T > 30º	83	89	86	93
Horas T < 12º	660	660	777	777
Horas T < 11º	141	141	408	408
Horas T < 10º	34	34	196	196
Horas T < 9º	1	1	70	70
Horas T < 8º	0	0	24	24
Horas RH > 80	3038	3266	2921	3150
Horas RH < 40	0	0	0	0

3.6 Modelo 6. 4 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.63m con velocidad 5m/s

Tras obtener en el apartado anterior resultados satisfactorios, decidimos probar con el menor número posible de tubos.

Para esta disposición requerimos un caudal total de 25000 kg/h. Al repartir el caudal por 4 equipos, cada uno de ellos tiene un caudal de 6250 kg/h (4833m³/h), obteniendo una caída de presión de 41.3 Pascales en cada uno de ellos.

Buscamos ventiladores en el catálogo de Soler & Palau en función de estos parámetros. En este caso, para satisfacer las demandas de presión y caudal es suficiente con un ventilador mural. Se considera que el más adecuado para nuestras características es el modelo HCBB/6-500H [38]. A continuación se muestra sus curvas características con el punto de operación en el que nos encontramos.

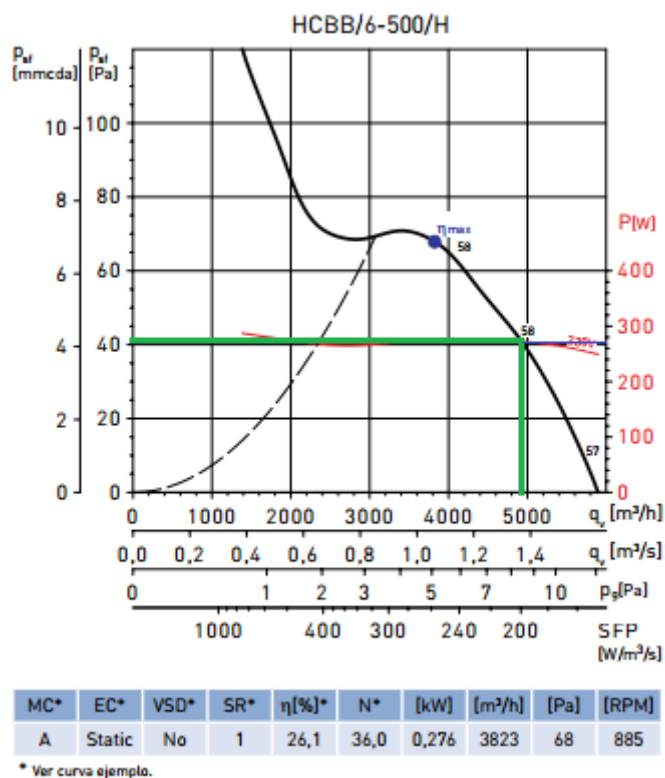


Figura 99. Curva ventilador modelo HCBB/6-500H y punto de operación.

- Presión: 41.3 Pa
- Caudal: 4833 m³/h
- Rendimiento: 0.20
- Potencia: 0.276 kW

Obtenemos los siguientes resultados, que mostramos comparados con la situación previa a la instalación del equipo:

Tabla 45. Resultados Modelo 6.

	EAHE 4t(63)·23m; v=5m/s		Sin EAHE	
Fechas simulación	5640-12384	5640-13104	5640-12384	5640-13104
Horas T > 26°	367	524	368	525
Horas T > 28°	171	218	171	218
Horas T > 30°	86	93	86	93
Horas T < 12°	768	768	777	777
Horas T < 11°	338	338	408	408
Horas T < 10°	149	149	196	196
Horas T < 9°	46	46	70	70
Horas T < 8°	8	8	24	24
Horas RH > 80	3010	3239	2921	3150
Horas RH < 40	0	0	0	0

3.7 Modelo 7. 8 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.63m con velocidad 5m/s

Tras comprobar que la disposición anterior es insuficiente, aumentamos el número de tubos a 8 (dos por equipo).

Para esta disposición requerimos un caudal total de 50000 kg/h. Al repartir el caudal por 4 equipos, cada uno de ellos tiene un caudal de 12500 kg/h (9667m³/h), obteniendo una caída de presión de 121 Pascales en cada uno de ellos.

Buscamos ventiladores en el catálogo de Soler & Palau en función de estos parámetros. En este caso, para satisfacer las demandas de presión y caudal es suficiente con un ventilador mural. Se considera que el más adecuado para nuestras características es el modelo HXBR/4-630 [39]. A continuación se muestra sus curvas características con el punto de operación en el que nos encontramos.

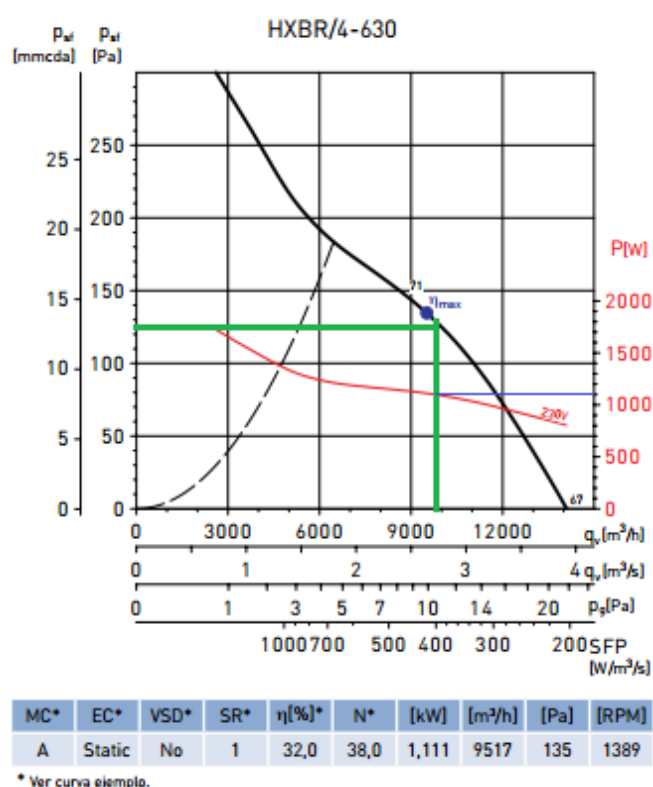


Figura 100. Curva ventilador HXBR/4-630 y punto de operación.

- Presión: 121 Pa
- Caudal: 9667 m³/h
- Rendimiento: 0.295
- Potencia: 1.1 kW

Obtenemos los siguientes resultados, que mostramos comparados con la situación previa a la instalación del equipo:

Tabla 46. Resultados Modelo 7.

Fechas simulación	EAHE 8t(63)·23m; v=5m/s		Sin EAHE	
	5640-12384	5640-13104	5640-12384	5640-13104
Horas T > 26º	367	524	368	525
Horas T > 28º	169	216	171	218
Horas T > 30º	85	92	86	93
Horas T < 12º	754	754	777	777
Horas T < 11º	252	252	408	408
Horas T < 10º	90	90	196	196
Horas T < 9º	23	23	70	70
Horas T < 8º	0	0	24	24
Horas RH > 80	3034	3263	2921	3150
Horas RH < 40	0	0	0	0

3.8 Modelo 8. 8 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.63m con velocidad 4m/s

Basándonos en el modelo anterior, en el que obtenemos resultados satisfactorios, bajamos la velocidad para reducir caudal y pérdida de presión, intentando utilizar ventiladores menos potentes y más económicos.

Para esta disposición requerimos un caudal total de 40000 kg/h. Al repartir el caudal por 4 equipos, cada uno de ellos tiene un caudal de 10000 kg/h ($7734\text{m}^3/\text{h}$), obteniendo una caída de presión de 78.7 Pascales en cada uno de ellos.

Buscamos ventiladores en el catálogo de Soler & Palau en función de estos parámetros. En este caso, para satisfacer las demandas de presión y caudal volvemos a utilizar un ventilador mural. Se considera que el más adecuado para nuestras características es el modelo HXTR/6-630 [39]. A continuación se muestra sus curvas características con el punto de operación en el que nos encontramos.

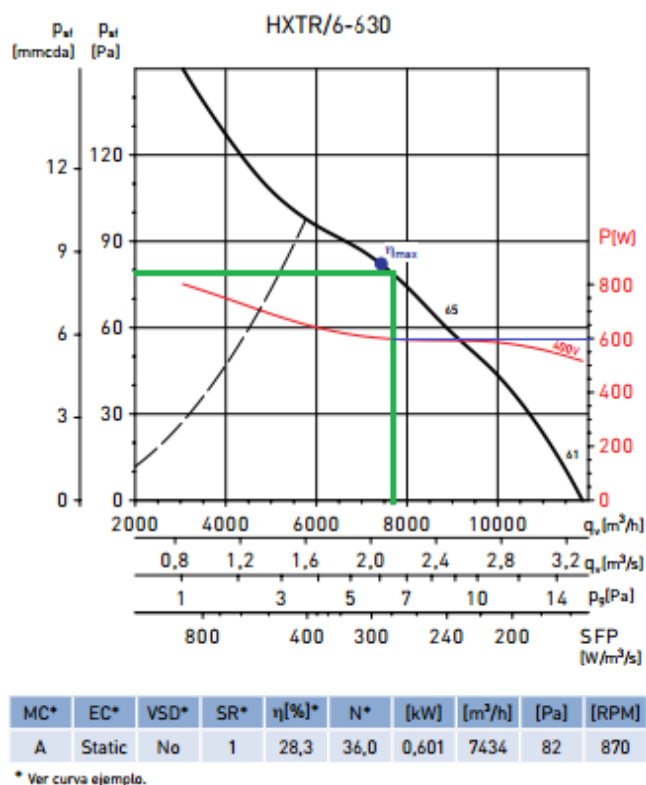


Figura 101. Curva ventilador HXTR/6-630 y punto de operación.

- Presión: 79.4Pa
- Caudal: 7734 m³/h
- Rendimiento: 0.284
- Potencia: 0.6 kW

Obtenemos los siguientes resultados, que mostramos comparados con la situación previa a la instalación del equipo:

Tabla 47. Resultados Modelo 8.

	EAHE 8t(63)-23m; v=4m/s		Sin EAHE	
Fechas simulación	5640-12384	5640-13104	5640-12384	5640-13104
Horas T > 26º	367	524	368	525
Horas T > 28º	170	217	171	218
Horas T > 30º	86	93	86	93
Horas T < 12º	754	754	777	777
Horas T < 11º	272	272	408	408
Horas T < 10º	103	103	196	196
Horas T < 9º	29	29	70	70
Horas T < 8º	0	0	24	24
Horas RH > 80	3040	3269	2921	3150
Horas RH < 40	0	0	0	0

3.9 Modelo 9. 8 tubos de 23 metros de longitud y diámetro 0.63m con velocidad 3m/s

Tras obtener resultados satisfactorios en el apartado anteriores, repetimos descendiendo la velocidad del aire que circula por los tubos a 3m/s.

Para esta disposición requerimos un caudal total de 30000 kg/h. Al repartir el caudal por 4 equipos, cada uno de ellos tiene un caudal de 7500 kg/h (5800m³/h), obteniendo una caída de presión de 45.2 Pascales en cada uno de ellos.

Buscamos ventiladores en el catálogo de Soler & Palau en función de estos parámetros. En este caso, para satisfacer las demandas de presión y caudal volvemos a utilizar un ventilador mural. Se considera que el más adecuado para nuestras características es el modelo HXTR/4-450/H [39]. A continuación se muestra sus curvas características con el punto de operación en el que nos encontramos.

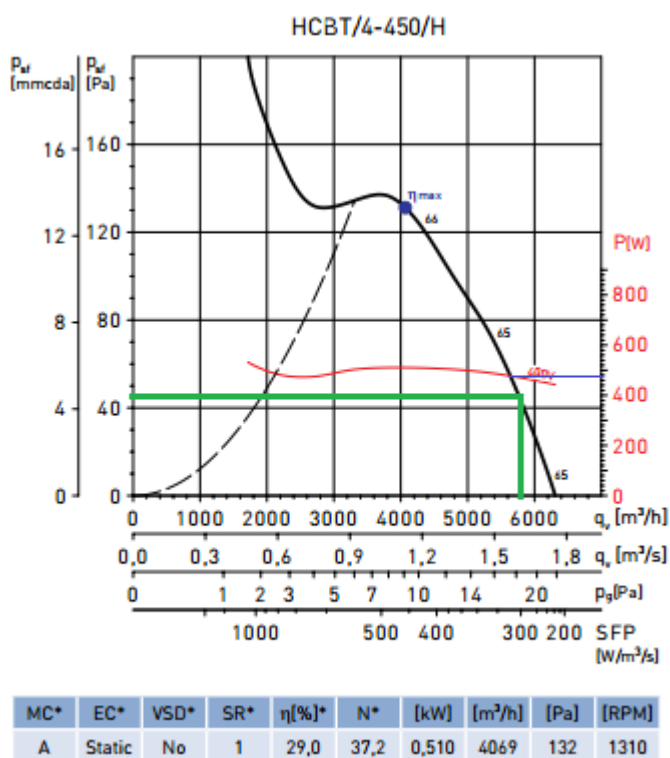


Figura 102. Curva ventilador HXTR/4-450/H y punto de operación.

- Presión: 23 Pa
- Caudal: 5800 m³/h
- Rendimiento: 0.146
- Potencia: 0.5 kW

Obtenemos los siguientes resultados, que mostramos comparados con la situación previa a la instalación del equipo:

Tabla 48. Resultados Modelo 9.

Fechas simulación	EAHE 8t(63)-23m; v=3m/s		Sin EAHE	
	5640-12384	5640-13104	5640-12384	5640-13104
Horas T> 26º	367	524	368	525
Horas T> 28º	169	216	171	218
Horas T> 30º	85	92	86	93
Horas T< 12º	756	756	777	777
Horas T< 11º	292	292	408	408
Horas T< 10º	107	107	196	196
Horas T< 9º	33	33	70	70
Horas T< 8º	3	3	24	24
Horas RH>80	3042	3271	2921	3150
Horas RH<40	0	0	0	0

En este caso no se llegan a cumplir los requisitos mínimos.

4 Análisis de los diversos modelos

En primer lugar, debemos destacar que en todos los casos, la aportación de frío que hace el equipo en verano es muy pobre, y no merece la pena alargar hasta finales de junio, dado que el equipo no aporta suficiente frío y sería muy costoso dimensionar uno alargar tan solo un mes la producción. Además, debemos tener en cuenta que durante el verano se puede realizar la producción a cielo abierto, que es mucho más económica.

En lo que respecta a la aportación de calor, nos podemos centrar en los valores hasta finales de mayo (5640-12384), dado que a partir de este mes no hay demanda. Para comparar las diversas opciones las mostramos en la siguiente tabla.

Tabla 49. Tabla con comparativa de los resultados previos a la instalación del EAHE y con los 9 Modelos. Datos hasta finales de Mayo (5640-12384).

	Sin EAHE	MOD 1	MOD 2	MOD 3	MOD 4	MOD 5	MOD 6	MOD 7	MOD 8	MOD 9
Horas T>26º	368	368	368	367	367	368	367	367	367	367
Horas T> 28º	171	167	165	165	168	169	171	169	170	169
Horas T> 30º	86	76	72	78	82	83	86	85	86	85
Horas T< 12º	777	572	632	745	753	660	768	754	754	756
Horas T< 11º	408	67	117	237	258	141	338	252	272	292
Horas T< 10º	196	9	19	77	89	34	149	90	103	107
Horas T< 9º	70	0	0	16	21	1	46	23	29	33
Horas T< 8º	24	0	0	0	0	0	8	0	0	3
Horas RH>80	2921	3057	3063	3062	3058	3038	3010	3034	3040	3042
Horas RH<40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Destacamos que las diferencia que obtenemos respecto al invernadero sin equipo cuando las temperaturas pasan de 30°C son muy bajas, teniendo en el mejor de los casos un descenso de 10 horas (un 11.62%). Debido al coste energético que tiene arrancar la instalación, no merece la pena realizar esta operación.

En cuanto al aporte de calor realizado para evitar bajar de los 8°C, podemos ver en verde las disposiciones válidas (la 1, 2, 3, 4, 5, 7 y 8). Pese a que todas cumplen el objetivo de mínimos que nos marcamos, algunas consiguen un mayor calentamiento del invernadero. Pero esta información que mostramos aquí es insuficiente. Debemos tener en cuenta también el consumo energético de los ventiladores, el cual se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 50. Tabla con los valores de aportación de calor y frío y rendimientos de cada modelo.

	MOD1	MOD2	MOD3	MOD4	MOD5	MOD6	MOD7	MOD8	MOD9
horas cold	172	172	172	172	172	172	172	174	173
Cons cold (kJ)	6,44E+06	2,72E+06	2,11E+05	1,98E+05	5,20E+06	6,84E+05	2,72E+06	1,50E+06	1,25E+06
Cold (kJ)	9,22E+06	8,54E+06	5,03E+06	4,39E+06	5,50E+06	1,60E+06	3,18E+06	3,16E+06	2,96E+06
COPcold	1,432	3,135	23,901	22,145	1,057	2,338	1,168	2,101	2,380
horas heat	429	458	479	482	465	498	481	488	489
Cons heat (kJ)	1,61E+07	7,25E+06	5,86E+05	5,55E+05	1,41E+07	1,98E+06	7,62E+06	4,22E+06	3,52E+06
Heat (kJ)	1,19E+07	1,29E+07	9,09E+06	8,07E+06	8,51E+06	3,32E+06	5,95E+06	5,95E+06	5,78E+06
COPheat	0,742	1,773	15,499	14,526	0,605	1,677	0,781	1,412	1,640

En la tabla mostramos el calor y frío aportado por cada modelo. Marcamos en rojo los modelos 6 y 9 dado que no pueden ser tenidos en cuenta la no llegar a los requerimientos mínimos.

Nos fijamos en tres parámetros básicos, el consumo de energía por el ventilador, el calor aportado y ratio de estos dos valores (COP). Añadir que los COPs reales serían mayores a los que aparecen en las tablas debido a que se han realizado simulaciones con un time-step de 1 hora, cuando en muchas franjas los equipos no trabajan durante este tiempo completo. Para realizar el cálculo del consumo eléctrico de estos equipos Trnsys asume que el consumo es igual al producto del número de en las cuales el ventilador ha estado encendido por su potencia nominal, asumiendo siempre que se trabaja la hora completa. Pese a ello, consideramos esta aproximación cercana a los valores reales y se realiza un redondeo pesimista para evitar sobrevalorar el rendimiento de la instalación. Añadir que realizar los cálculos con un time-step más pequeño no aporta mucha más información y hubiese imposibilitado la opción de realizar un número tan elevado de simulaciones.

Destacamos el modelo 3, el que menos consume y de los que da una mayor aportación de calor, teniendo el mejor ratio (15.5). Sin ser tan eficiente (1.41), destacamos también el modelo 8, dado que al estar formado solo por 8 tubos, pese a que el coste energético de hacerlo funcionar pueda ser superior, es más barato de fabricar. Pese a ello, consideramos que la opción 8 seguiría sin ser viable debido a que las bombas de calor de calor aportan COPs de ente 3 y 5, y su coste es mucho más reducido al que pueda tener la instalación del EAHE, independientemente del número o tamaño de tubos.

Por todo ello, se selecciona el modelo 3 como el de mayor viabilidad, por tanto se presupuestará para realizar un estudio económico y comparar la amortización del equipo enfrentado a algunos métodos clásicos de aporte de calor, como bien pueden ser una caldera o una bomba de calor.

Para poder realizar tal comparación, debemos tener en cuenta los siguientes parámetros de la instalación del EAHE seleccionada:

Tabla 51. Propiedades del modelo escogido.

Parámetro	EAHE Modelo 3
Horas aportando calor (h)	479
Potencia instalada (kW)	0.34
Consumo energético (kWh (y kJ))	162.86 (5,86E+05)
Calor aportado (kJ)	9,09E+06
COP heat (kJ/kJ)	15,499
Potencia media (kW)	5.28
Potencia máxima requerida (kW)	11.17

Álvaro Rodríguez Almaraz

**Sistemas de climatización de bajo impacto ambiental
para invernaderos**

**Trabajo Fin de Máster
dirigido por el Dr. Joan Manel Vallès Rasquera**

Máster en Ingeniería Industrial

Anexo 3. Justificaciones del modelo con PCM



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2017

Índice del anexo de justificaciones del modelo con PCM

1	Distribución placas de PCM	2
2	Modelos considerados	3
2.1	Modelo 1. PCM de 18°C	3
2.2	Modelo 2. PCM de 11°C	7
2.3	Modelo 3. PCM de 9°C	10
2.4	Modelo 4. PCM de 8°C	14
3	Análisis de los diversos modelos.....	18

1 Distribución placas de PCM

En primer lugar, para considerar la distribución de las placas de PCM debemos tener en cuenta la distribución del cultivo y el tamaño de las placas de PCM de RubiTherm (450mm de ancho, 300mm de alto y 15mm de espesor).

Se colocaran las placas de PCM entre las líneas de cultivo. Colocamos 11 líneas de placas de PCM entre el cultivo, con una longitud de 38m. En la siguiente imagen se puede ver como se distribuyen las líneas de placas de PCM (en línea discontinua).

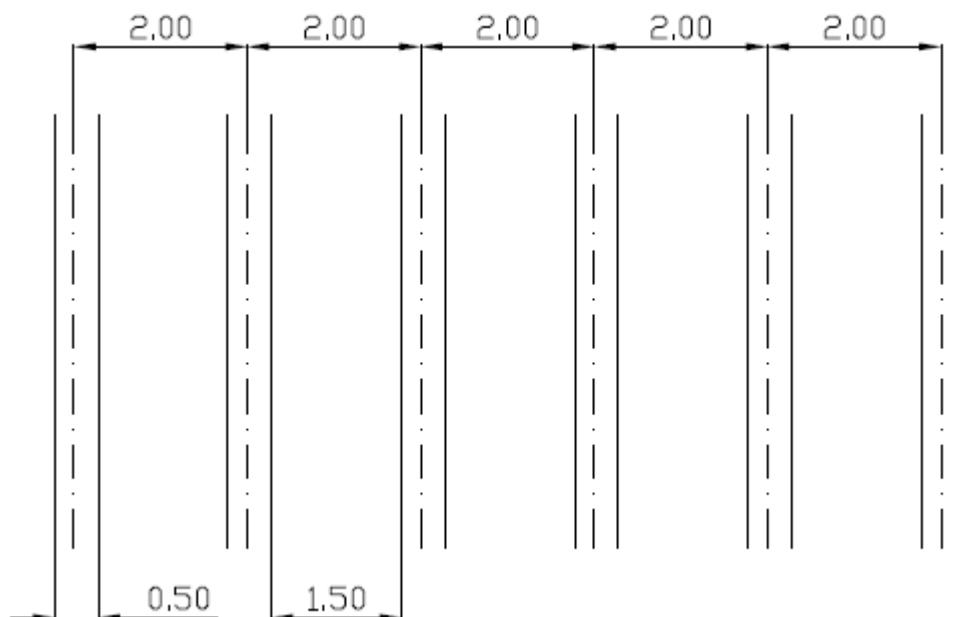


Figura 103. Distribución placas de PCM.

Decidimos colocar 50 placas de PCM a lo largo de cada hilera, teniendo placas cada 75cm con una separación de 30cm entre ellas, obteniendo un total de 550 placas. Esta configuración nos permite tener una distancia suficiente entre placas para realizar labores de mantenimiento y a la vez un alto número de placas cercanas a las plantas para conseguir transmitir rápidamente a estas el calor desprendido. También debemos destacar la importancia de que no colocar placas verticalmente, dado que facilitaríamos la incidencia directa de la luz solar sobre estas, variando el modo real de funcionamiento de la placa.

Se realizarán pruebas con diversos tipos de placas de catálogo.

Estas placas tienen un PVP de 10€ por unidad, sin embargo, para un pedido como el que nosotros realizaríamos, podemos suponer un descenso del precio de estas de hasta un 50%.

Destacar que deberemos considerar las características de los PCM para aportar estos valores al type creado, a partir del cual realizaremos la simulación (type 189). Para ello se aportará una figura donde aparezca toda la información que proporciona el fabricante, y que posteriormente Trnsys nos requerirá.

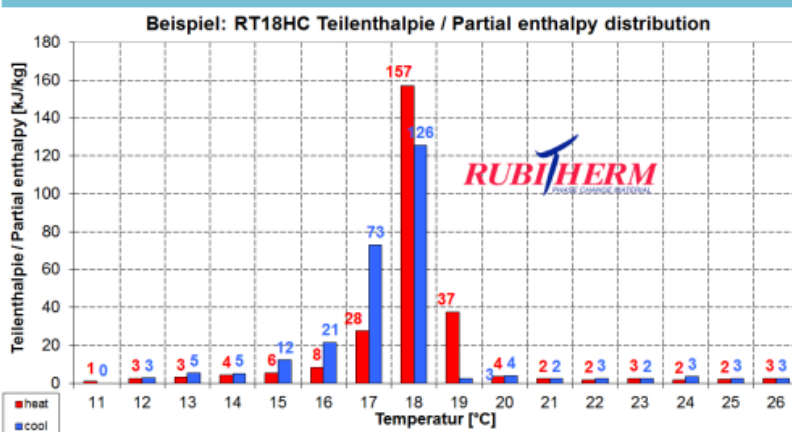
Debe tenerse en cuenta que el análisis que realiza Trnsys considera todo el invernadero un solo nodo, por lo que la temperatura que dé será temperatura global, mientras que las plantas, que están a escasos 25cm de las placas, pueden tener una temperatura ligeramente superior a la que Trnsys, por tanto hacemos el estudio con cálculos pesimistas respecto a la situación real.

2 Modelos considerados

2.1 Modelo 1. PCM de 18°C

En primer lugar probamos un PCM de 18°C, el cual tiene una mayor capacidad de almacenamiento de valor 260kJ/kg. A continuación se muestran las propiedades del PCM seleccionado.

The most important data:		Typical Values	
Melting area		17-19	[°C]
		main peak:18	
Congeeing area		19-17	[°C]
		main peak:17	
Heat storage capacity ± 7,5%		260	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 11°C to 26°C.		72	[Wh/kg]*
Specific heat capacity		2	[kJ/kg·K]
Density solid at 15 °C		0,88	[kg/l]
Density liquid at 25 °C		0,77	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)		0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion		12,5	[%]
Flash point		135	[°C]
Max. operation temperature		50	[°C]



Rubitherm Technologies GmbH
 Sperenberger Str. 5a
 D-12277 Berlin
 Tel: +49 30 720004-62
 Fax: +49 30 720004-99
 E-Mail: info@rubitherm.com
 Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 31.05.2016

*Measured with 3-layer-calorimeter.

Figura 104. PCM de 18°C [41].

Realizamos una primera prueba con este modelo dado que parece interesante debido a su alta capacidad de calor, sin embargo se corre el riesgo de haber escogido una temperatura de cambio de fase exageradamente alta, teniendo periodos de tiempo en los que no se llega a dar el cambio de fase, quedándonos sin aportación de calor cuando bajan las temperaturas.

Una vez introducida la información en Trnsys, realizamos la simulación para todo un año. A continuación mostramos los gráficos para toda la temporada obtenidos.

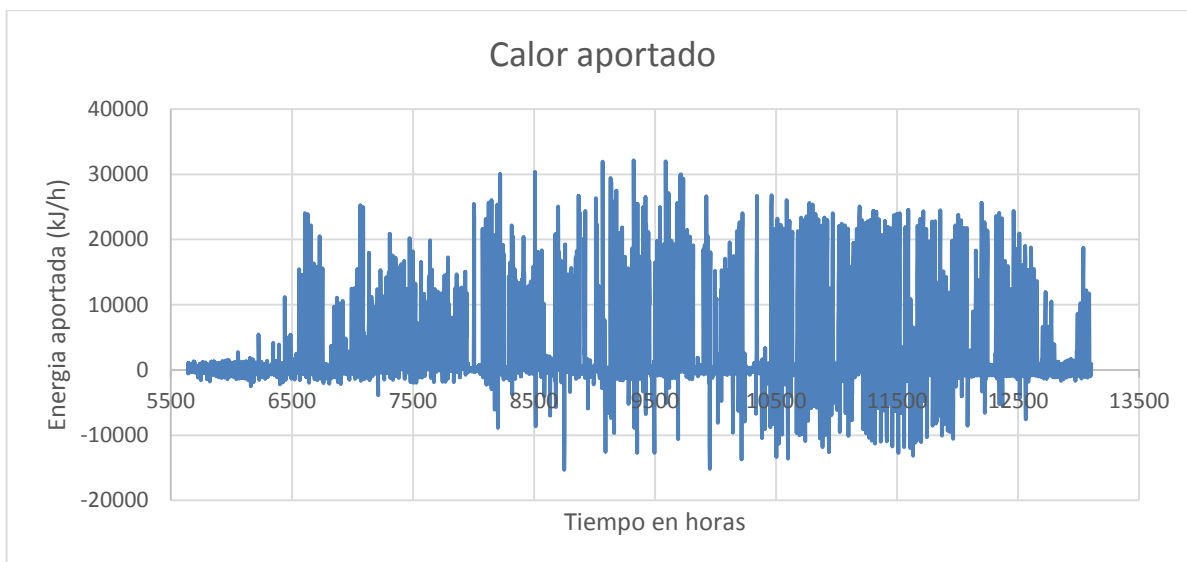


Figura 105. Calor aportado por las placas de PCM de 18°C a lo largo de la temporada.

En este gráfico podemos ver los picos de calor aportado, teniendo hasta 30000kJ/h (unos 8.3kW). Sin embargo debe destacarse que estas potencias térmicas se dan durante un corto periodo de tiempo.

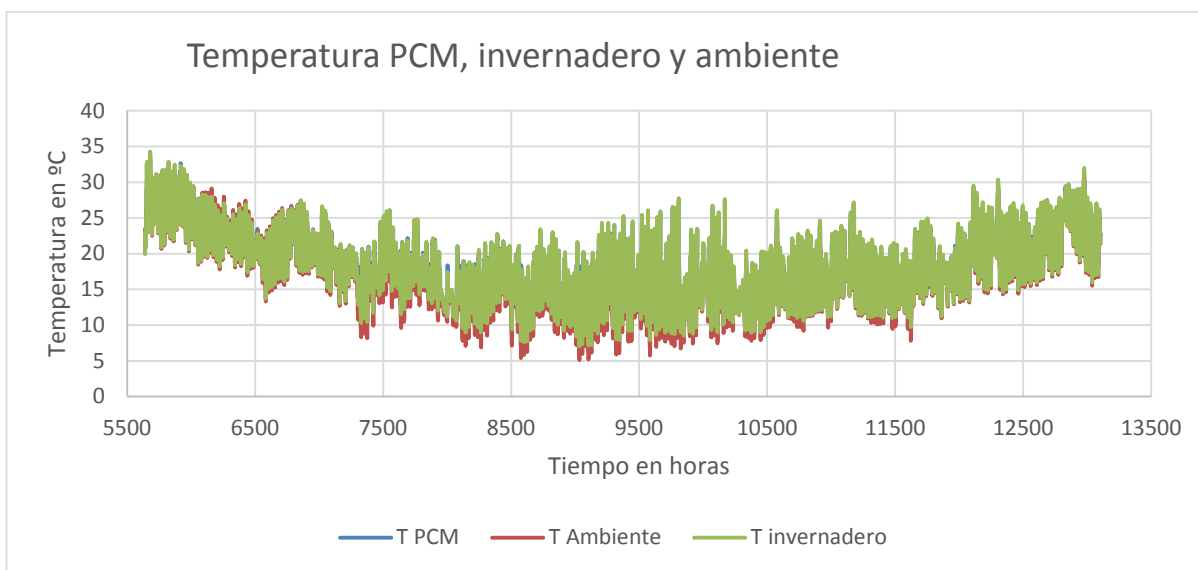


Figura 106. Perfil de temperaturas para la temporada con placas de PCM de 18°C.

Para poder analizar la situación que nos interesa, que son los días donde podemos tener temperaturas inferiores a los 8°C, graficamos los días 13, 14 y 15 de Enero, donde podremos observar la evolución de las temperaturas y del calor aportado con mayor detalle.

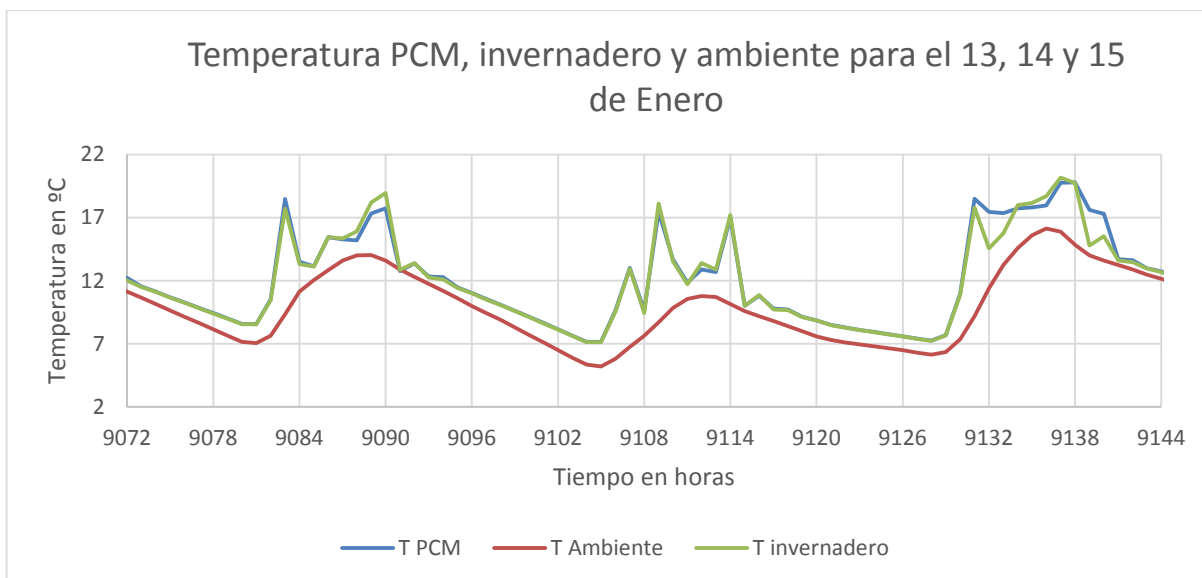


Figura 107. Perfil de temperaturas entre las horas 9072-9144 con placas de PCM de 18°C.

En primer lugar, respecto a las temperaturas, podemos observar como hay días, que al no superar los 18°C, el PCM no cambiará de fase. Eso se traduce en una baja aportación de calor. En este gráfico de temperaturas podemos ver la diferencia entre la Temperatura del PCM y la del invernadero. Para el día 14 de Enero, podemos ver como ambas temperaturas son prácticamente idénticas.

En cambio para el día 15 de Enero, al llegar a 20°C, si tenemos cambio de fase, lo que provocará una mayor aportación de calor del PCM.

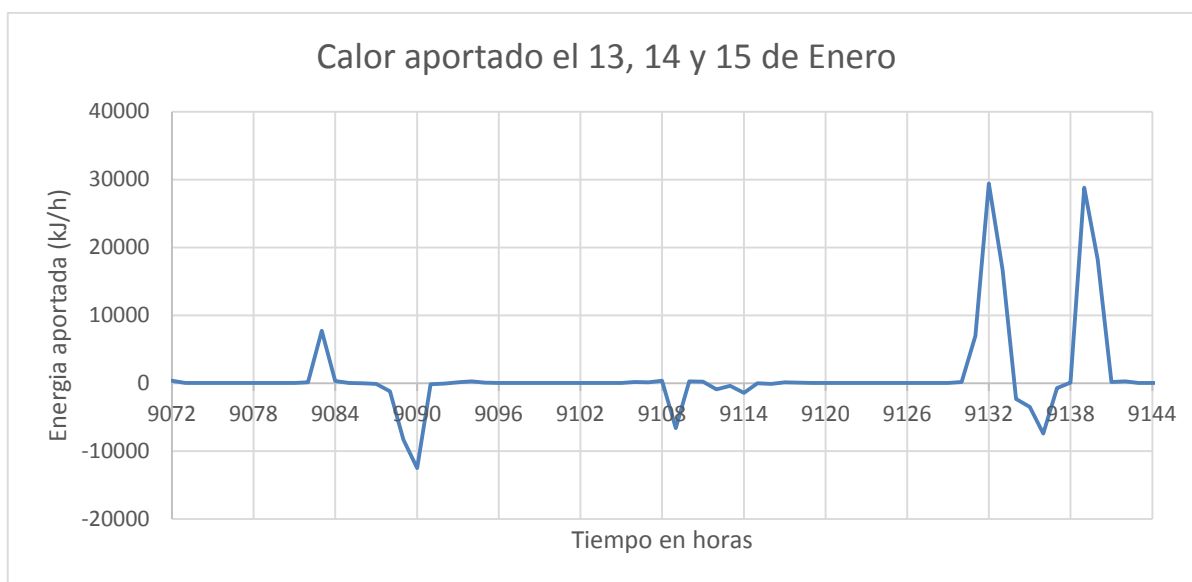


Figura 108. Calor aportado por las placas de PCM de 18°C entre las horas 9072-9144.

En este segundo gráfico podemos ver el calor aportado. Se comprueba cómo durante el 14 de Enero la aportación es muy pobre. Pese a no llegar a los 18°C tenemos una leve aportación, debido al rango de temperaturas del PCM, donde se produce parte del cambio de fase se produce antes, debido a que los PCM están formados por diversos compuestos, y no todos realizan el cambio de fase a la misma temperatura (en este caso ya hay cambio de fase

a 17°C). Sin embargo, su mayor rendimiento lo dan pasada la temperatura nominal, en este caso, 18°C.

Los picos que aparecen para el día 15 de Enero coinciden con las horas en las que la temperatura del PCM es superior a la del invernadero, dado a que se ha llegado a haber cambio de fase.

A continuación se muestra la aportación de calor total de las placas y la tabla de temperaturas comparando el modelo actual con el modelo sin placas.

Tabla 52. Aportación de calor por la placa de PCM de 18°C.

Fechas simulación	PCM 18°C	
	5640-12384	5640-13104
calor desprendido (kJ)	6.80E+06	7.21E+06
calor absorbido (kJ)	-6.80E+06	-7.21E+06

Tabla 53. Temperaturas y RH con la placa de PCM de 18°C y sin PCM.

Fechas simulación	PCM 18°C		Sin PCM	
	5640-12384	5640-13104	5640-12384	5640-13104
Horas T > 26º	367	524	368	525
Horas T > 28º	171	218	171	218
Horas T > 30º	86	93	86	93
Horas T < 12º	770	770	777	777
Horas T < 11º	400	400	408	408
Horas T < 10º	196	196	196	196
Horas T < 9º	70	70	70	70
Horas T < 8º	24	24	24	24
Horas RH > 80	2856	3081	2921	3150
Horas RH < 40	0	0	0	0

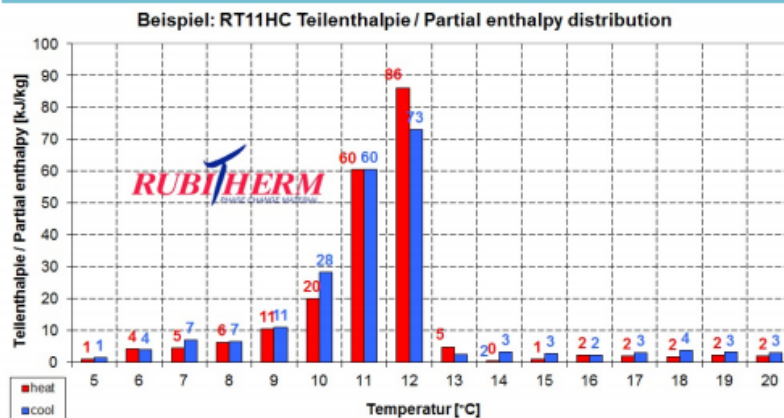
Mediante la tabla de comparación de temperaturas, podemos ver como este PCM no consigue ninguna variación sobre las horas por debajo de 8°C, por lo tanto, no se adecua a nuestras necesidades.

2.2 Modelo 2. PCM de 11°C

En este caso escogemos un PCM con una temperatura de cambio de fase que siempre se vaya a dar, 11°C. Este PCM tiene una capacidad de almacenamiento de calor de 200kJ/kg.

A continuación se muestran las propiedades del PCM seleccionado.

The most important data:		Typical Values	
Melting area		10-12	[°C]
		main peak: 12	
Congeeing area		12-10	[°C]
		main peak: 12	
Heat storage capacity ± 7,5%		200	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 5 °C to 20°C.		55	[Wh/kg]*
Specific heat capacity		2	[kJ/kg·K]
Density solid at 0 °C		0,88	[kg/l]
Density liquid at 20 °C		0,77	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)		0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion		12,5	[%]
Flash point		130	[°C]
Max. operation temperature		40	[°C]



Rubitherm Technologies GmbH
 Sperenberger Str. 5a
 D-12277 Berlin
 Tel: +49 30 720004-62
 Fax: +49 30 720004-99
 E-Mail: info@rubitherm.com
 Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 31.05.2016

*Measured with 3-layer-calorimeter.

Figura 109. PCM de 11°C [41].

Seleccionamos este modelo dado que además de tener una temperatura que siempre se supera, asegurando cambio de fase, tiene una alta capacidad de retención de calor respecto a los modelos de temperaturas colindantes.

A continuación se muestran los resultados de la simulación.

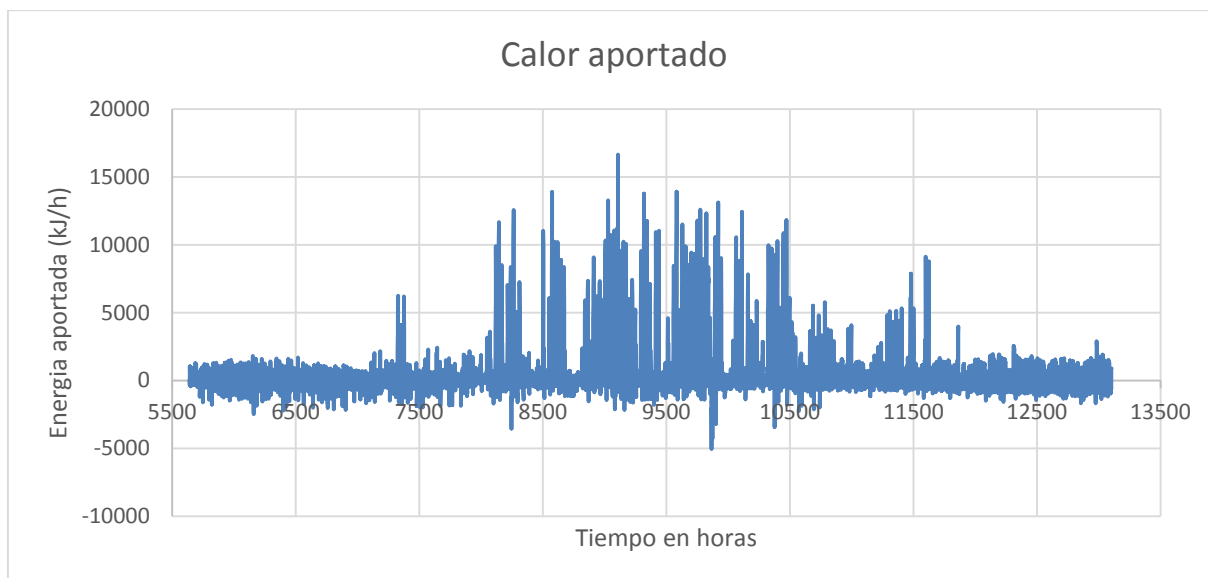


Figura 110. Calor aportado por las placas de PCM de 11°C a lo largo de la temporada.

Observamos que el número de picos de calor respecto al PCM de 18°C disminuye, esto es debido a que durante gran parte del tiempo el invernadero está siempre por encima de esta temperatura, y por lo tanto no hay cambio de fase.

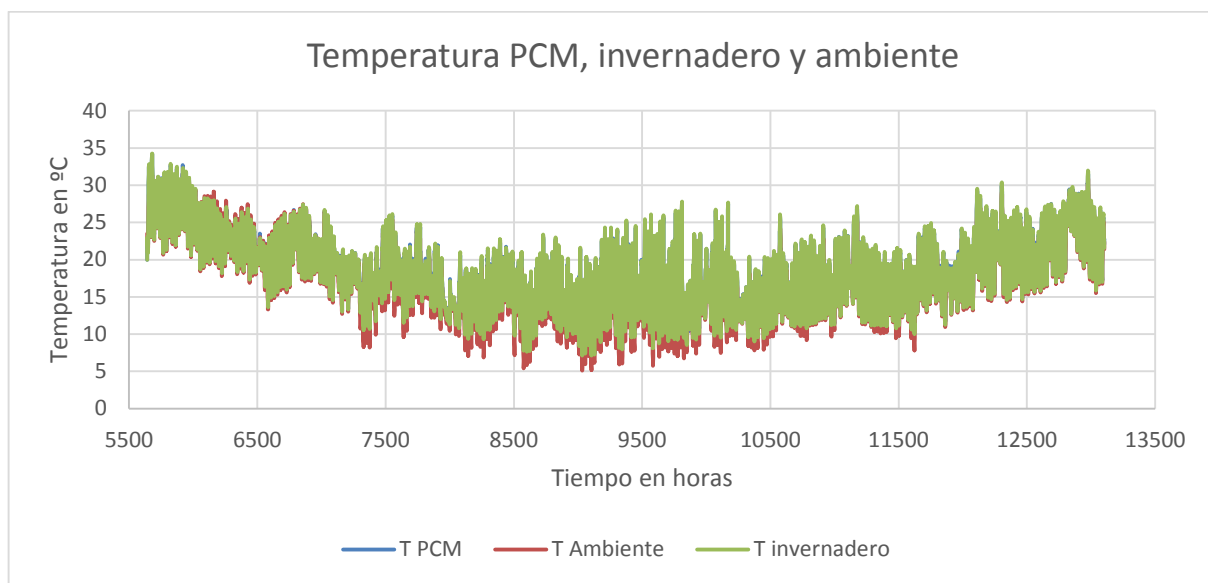


Figura 111. Perfil de temperaturas para la temporada con placas de PCM de 11°C.

Para poder analizar la situación que nos interesa, que son los días donde podemos tener temperaturas inferiores a los 8°C, graficamos los días 13, 14 y 15 de Enero, donde podremos observar la evolución de las temperaturas y del calor aportado con mayor detalle.

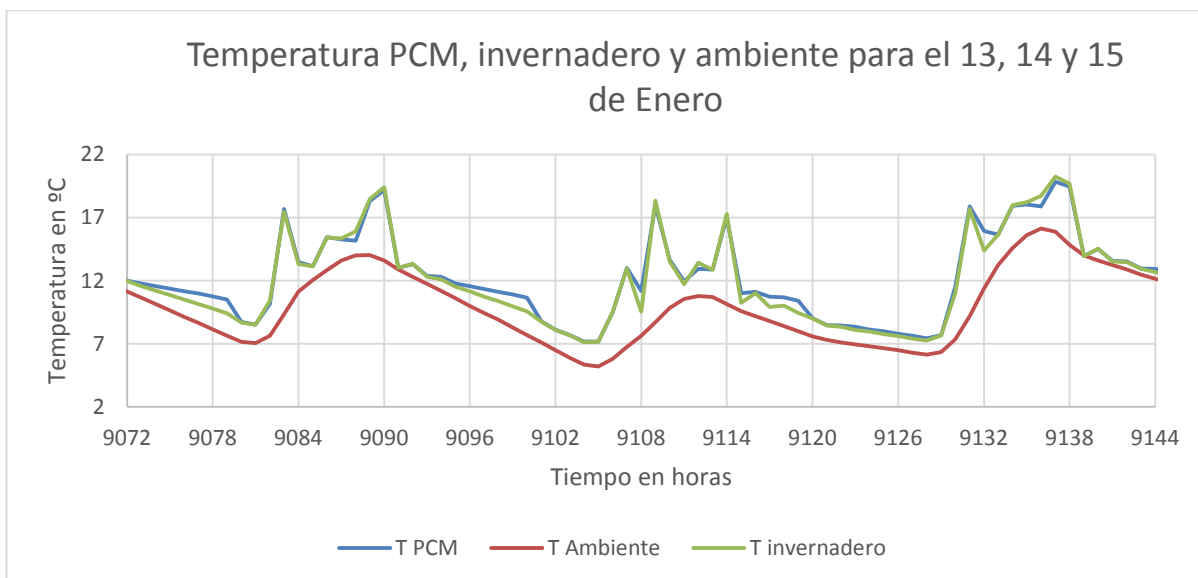


Figura 112. Perfil de temperaturas entre las horas 9072-9144 con placas de PCM de 11°C.

En este caso podemos ver como durante estos tres días la temperatura del PCM ha llegado a ser superior a la del invernadero debido a que el PCM ha tenido cambio fase. Además podemos comprobar como la temperatura del invernadero siempre ha sobrepasado los 11°C. Sin embargo, tras realizar la aportación de calor, las placas de PCM se enfrían y finalmente su temperatura es igual a la del invernadero, llegando a bajar de los 8°C. Consideramos que esto es debido a que el cambio de fase todavía está alejado de la temperatura que queremos mantener, y tras realizar la aportación de calor, el invernadero, con una alta tasa de infiltración y con paredes muy finas, es incapaz de guardar este calor aportado. Por ello se estudiará la opción de poner PCM que tenga el cambio de fase a la temperatura que deseamos mantener, pese a que tengan una capacidad de almacenamiento de calor inferior.

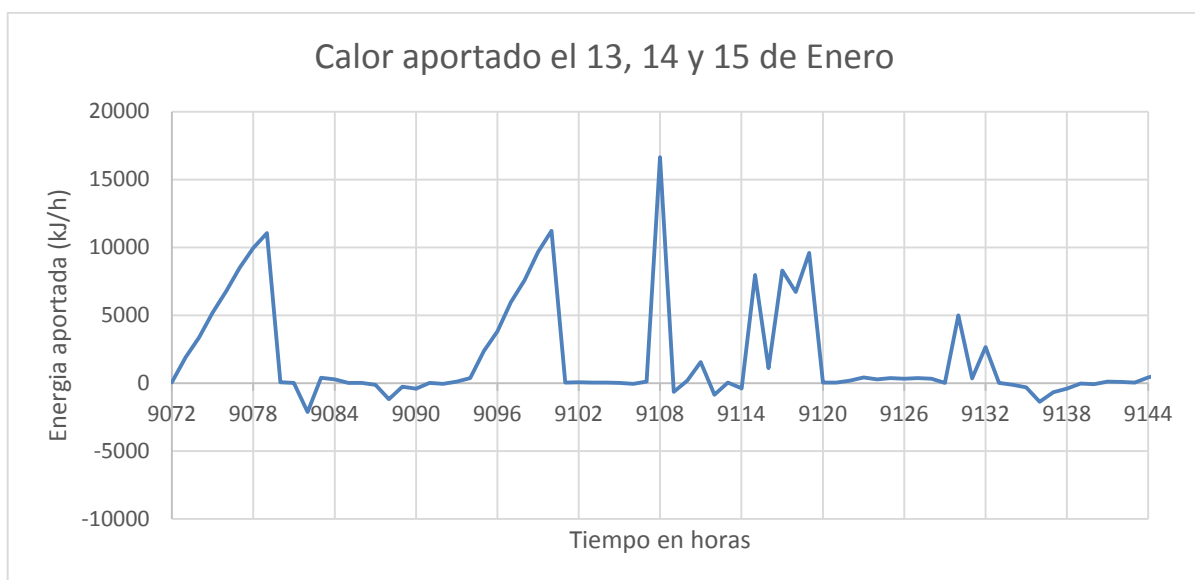


Figura 113. Calor aportado por las placas de PCM de 11°C entre las horas 9072-9144.

Mediante esta otra imagen podemos ver cómo, pese a que los picos de calor aportados son menores respecto al PCM de 18°C, todos los días llegamos a tener esta aportación extra de calor por parte del PCM dado que se ha completado el cambio de fase.

A continuación se muestra la aportación de calor total de las placas y la tabla de temperaturas comparando el modelo actual con el modelo sin placas.

Tabla 54. Aportación de calor por la placa de PCM de 11°C.

Fechas simulación	PCM 11°C	
	5640-12384	5640-13104
calor desprendido (kJ)	1.85E+06	1.96E+06
calor absorbido (kJ)	-1.85E+06	-1.97E+06

Tabla 55. Temperaturas y RH con la placa de PCM de 11°C y sin PCM.

Fechas simulación	PCM 11°C		Sin PCM	
	5640-12384	5640-13104	5640-12384	5640-13104
Horas T > 26º	366	523	368	525
Horas T > 28º	171	218	171	218
Horas T > 30º	86	93	86	93
Horas T < 12º	775	775	777	777
Horas T < 11º	368	368	408	408
Horas T < 10º	147	147	196	196
Horas T < 9º	56	56	70	70
Horas T < 8º	22	22	24	24
Horas RH > 80	2876	3104	2921	3150
Horas RH < 40	0	0	0	0

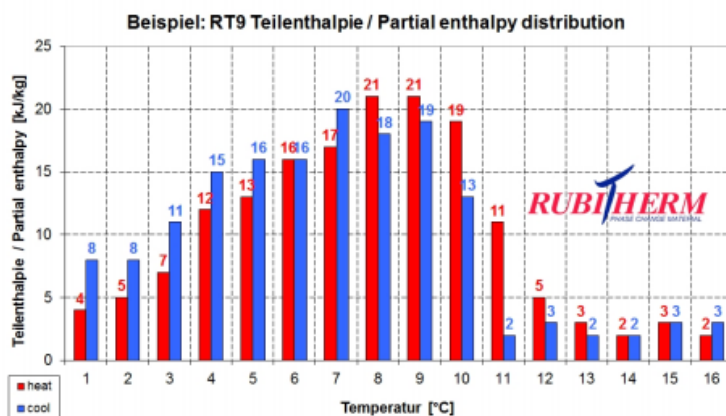
Tenemos un descenso de horas por debajo de los 8°C, sin embargo no es significativo (tan solo 2 horas, menos de un 10%), por lo que consideramos que este modelo no se adecua a nuestras necesidades.

2.3 Modelo 3. PCM de 9°C.

En este caso escogemos un PCM de 9°C, que con el margen de temperaturas entre las que actúa, podemos considerar que funde desde los 8 hasta los 11°C, incluyendo todo el margen de temperaturas sobre el que deseamos actuar en el invernadero.

Este PCM tiene una capacidad de almacenamiento de calor de 170kJ/kg. A continuación se muestran las propiedades del PCM seleccionado.

The most important data:		Typical Values	
Melting area		8-11	[°C]
		main peak:9	
Congeealing area		11-8	[°C]
		main peak:9	
Heat storage capacity ± 7,5%		170	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 2 °C to 17°C.		47	[Wh/kg]*
Specific heat capacity		2	[kJ/kg·K]
Density solid at -15°C		0,88	[kg/l]
Density liquid at 15 °C		0,76	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)		0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion		14	[%]
Flash point		120	[°C]
Max. operation temperature		40	[°C]



Rubitherm Technologies GmbH
 Sperenberger Str. 5a
 D-12277 Berlin
 Tel: +49 30 720004-62
 Fax: +49 30 720004-99
 E-Mail: info@rubitherm.com
 Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 31.05.2016

*Measured with 3-layer-calorimeter.

Figura 114. PCM de 9°C [41].

Tras introducir los valores al type 189, realizamos la simulación con el siguiente resultado.



Figura 115. . Calor aportado por las placas de PCM de 9°C a lo largo de la temporada.

De nuevo observamos como los picos de calor aportado vuelven a ser menores respecto a los modelos anteriormente comentados, al escoger una temperatura más baja para el cambio de fase. A esto hay que sumar que este PCM también acumula menos calor que los dos utilizados anteriormente.

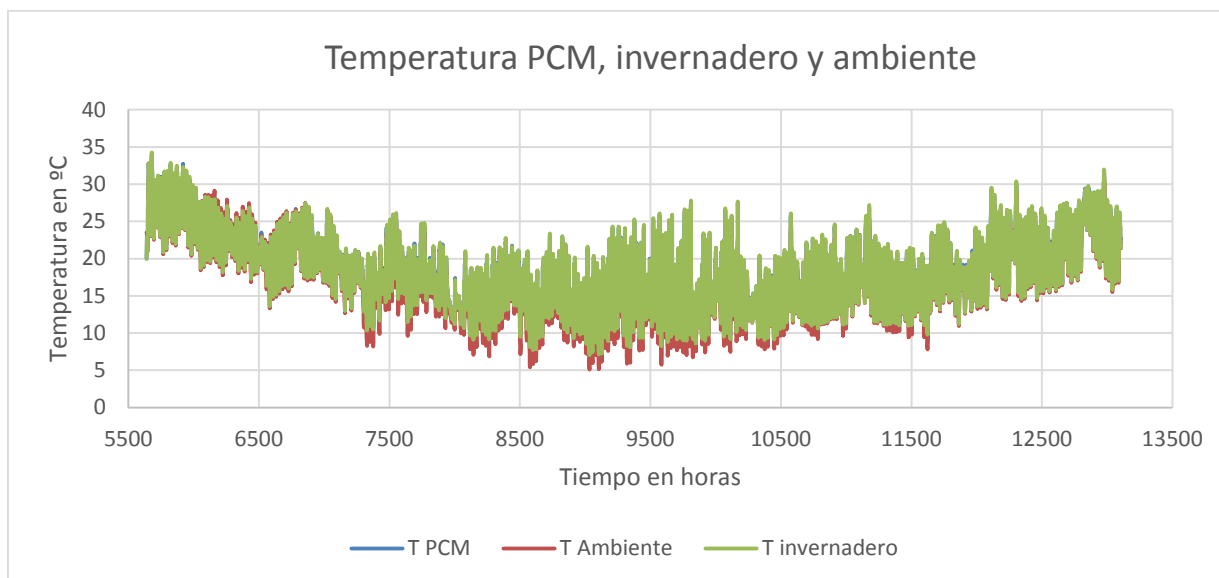


Figura 116. Perfil de temperaturas para la temporada con placas de PCM de 9°C.

Volvemos a graficar los días 13, 14 y 15 de Enero para analizar detalladamente la eficiencia del PCM en nuestro invernadero para conseguir mantener temperaturas por encima de 8°C.

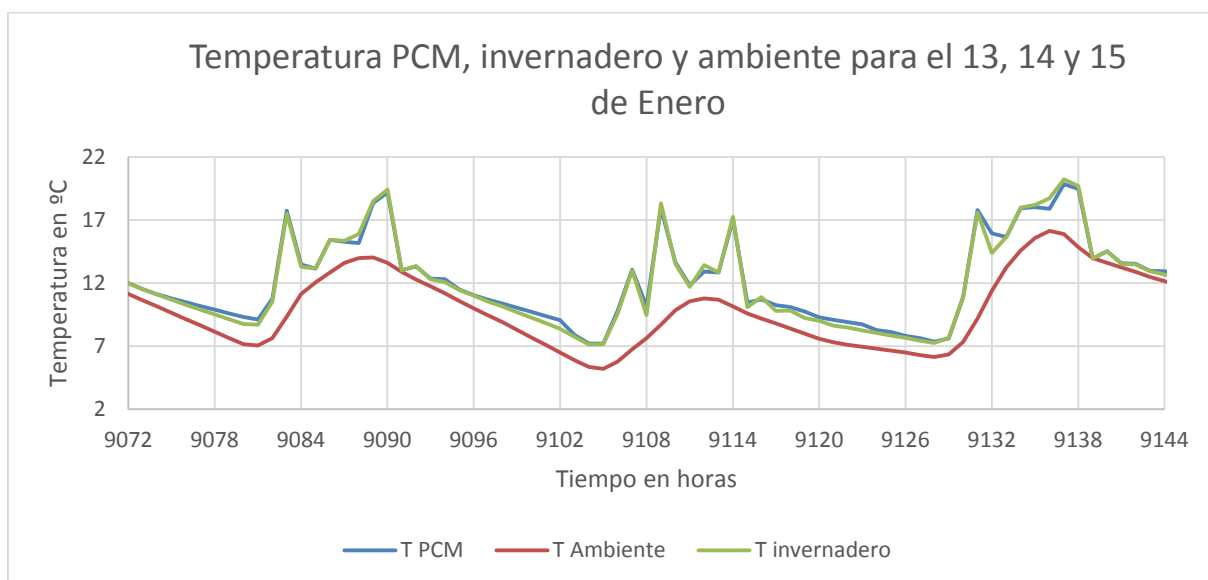


Figura 117. Perfil de temperaturas entre las horas 9072-9144 con placas de PCM de 9°C.

Observamos como la temperatura del PCM, se separa de la del invernadero para ser superior a esta cerca de los mínimos diarios, aportando el calor por tanto durante las horas más frías en los días críticos.

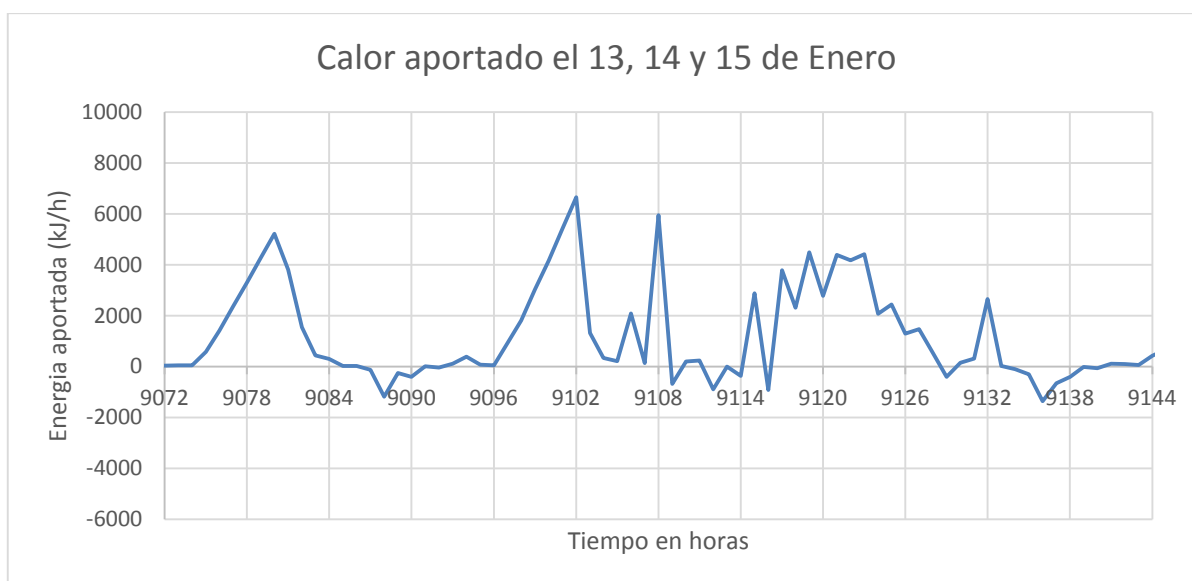


Figura 118. Calor aportado por las placas de PCM de 9°C entre las horas 9072-9144.

Mediante el gráfico de energía aportado podemos observar como los picos de calor coinciden con las horas en las que la temperatura del PCM es superior a la del invernadero. Pese a que la aportación de calor por parte del PCM es menor a la de los casos anteriores, vemos que esta se produce durante los 3 días analizados, y durante las horas de menor temperatura. Sin embargo, la aportación de calor es tan baja, que las diferencias respecto a los casos anteriores para los días observados no son significativas.

A continuación se muestra la aportación de calor total de las placas y la tabla de temperaturas comparando el modelo actual con el modelo sin placas.

Tabla 56. Aportación de calor por la placa de PCM de 9°C.

Fechas simulación	PCM 9°C	
	5640-12384	5640-13104
calor desprendido (kJ)	1.19E+06	1.31E+06
calor absorbido (kJ)	-1.19E+06	-1.31E+06

Tabla 57. Temperaturas y RH con la placa de PCM de 9°C y sin PCM.

Fechas simulación	PCM 9°C		Sin PCM	
	5640-12384	5640-13104	5640-12384	5640-13104
Horas T > 26°	366	523	368	525
Horas T > 28°	171	218	171	218
Horas T > 30°	86	93	86	93
Horas T < 12°	773	773	777	777
Horas T < 11°	401	401	408	408
Horas T < 10°	187	187	196	196
Horas T < 9°	57	57	70	70
Horas T < 8°	16	16	24	24
Horas RH > 80	2904	3132	2921	3150
Horas RH < 40	0	0	0	0

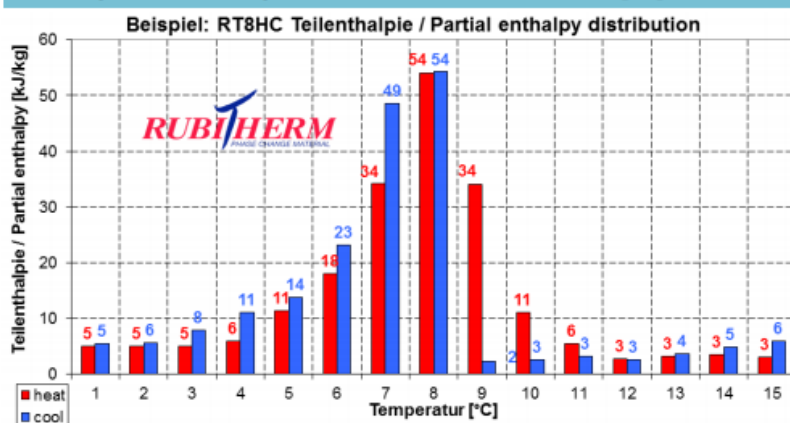
Observamos descenso en el número de horas por debajo de 9 y 8°C del 20% y del 33%.

2.4 Modelo 4. PCM de 8°C.

Realizamos una simulación con un PCM de cambio de fase 8°C, coincidiendo justo con la temperatura de la que no deseamos bajar. Destacar, que este PCM realmente funde entre 7 y 9°C, por lo que parte de su rendimiento está por debajo de los 8°C, por lo que parte de su actuación no nos ayudará a evitar bajar de los 8°C que deseamos mantener para todo el año. En caso de aumentar el número de placas hasta conseguir no bajar nunca de los 8°C, estaríamos perdiendo parte del efecto de estas, siendo no eficiente por tanto la elección de estas.

Este PCM tiene una capacidad de almacenamiento de calor de 190kJ/kg. A continuación mostramos el resto de sus características de la placa utilizada.

The most important data:		Typical Values	
Melting area		7-9	[°C]
		main peak: 8	
Congeeing area		8-7	[°C]
		main peak: 8	
Heat storage capacity ± 7,5%		190	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 1 °C to 15°C.		56	[Wh/kg]*
Specific heat capacity		2	[kJ/kg·K]
Density solid at -15°C		0,88	[kg/l]
Density liquid at 15°C		0,77	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)		0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion		12,5	[%]
Flash point		120	[°C]
Max. operation temperature		40	[°C]



Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 15.03.2017

*Measured with 3-layer-calorimeter.

Figura 119. PCM de 8°C [41].

Tras introducir los valores al type 189, realizamos la simulación con el siguiente resultado.

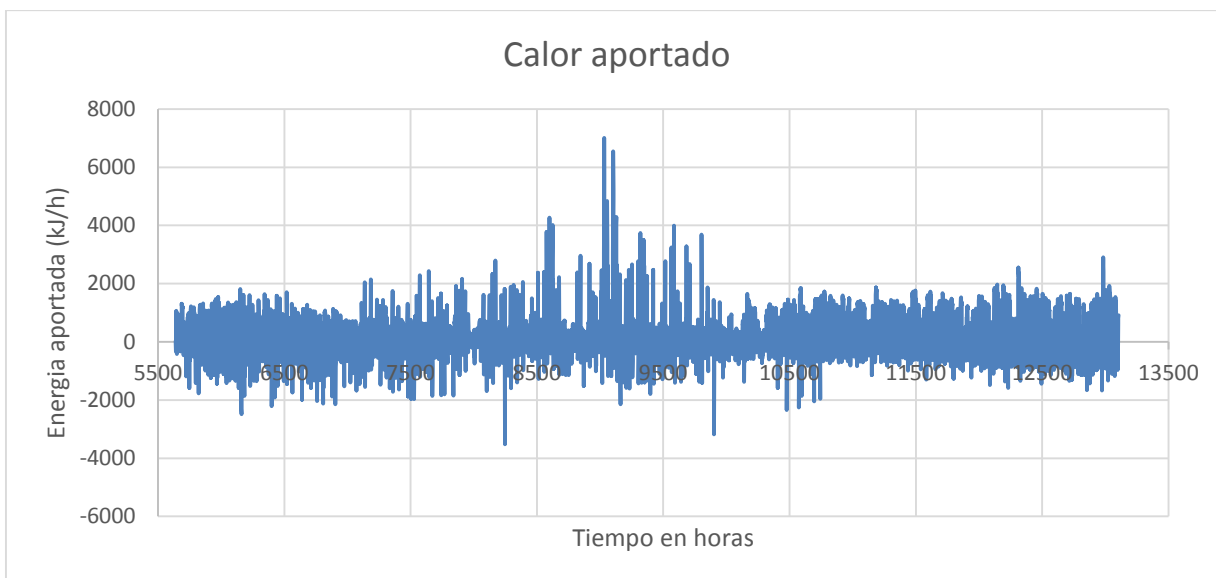


Figura 120. Calor aportado por las placas de PCM de 8°C a lo largo de la temporada.

Vemos de nuevo como los picos de aportación vuelven a descender, al volver a tener una temperatura más baja de cambio de fase.

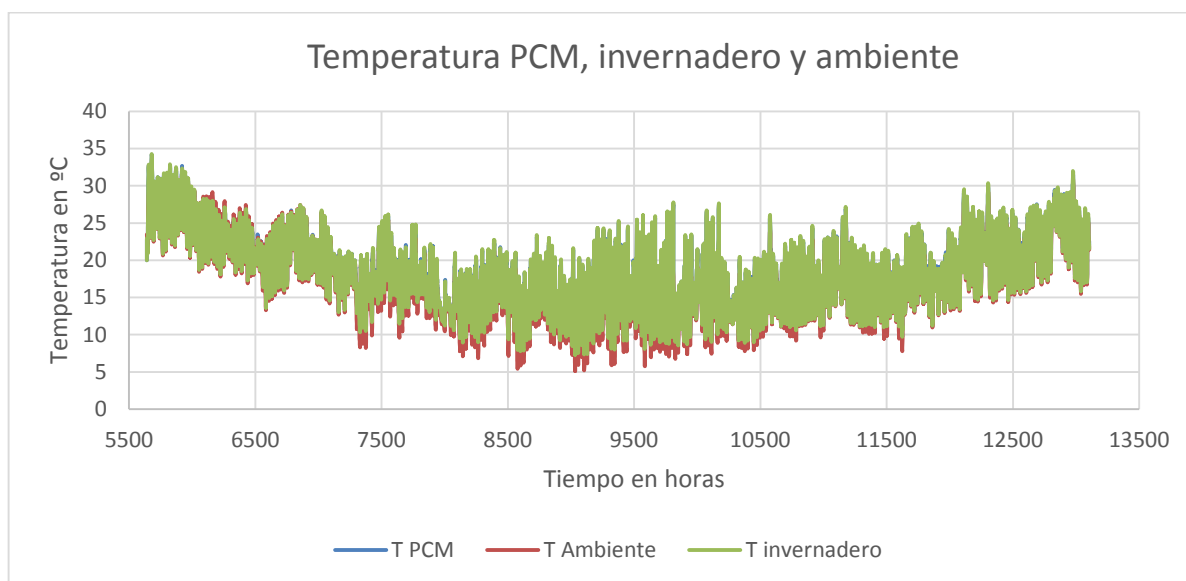


Figura 121. Perfil de temperaturas para la temporada con placas de PCM de 8°C.

Volvemos a mostrar los días 13, 14 y 15 de enero para poder analizar detalladamente la evolución de las temperaturas.

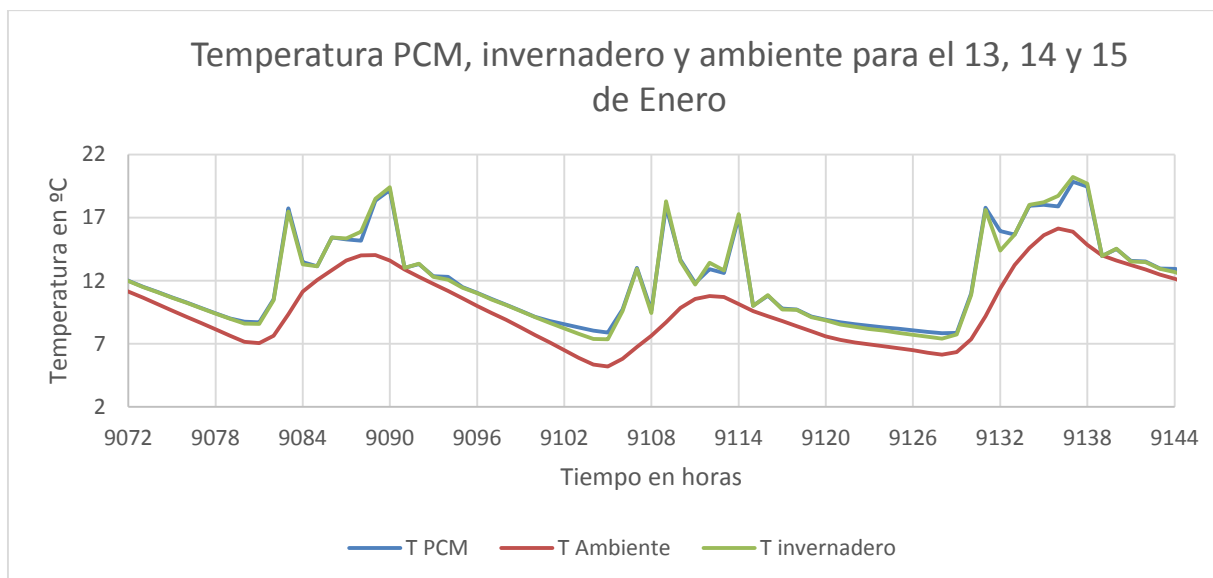


Figura 122. Perfil de temperaturas entre las horas 9072-9144 con placas de PCM de 8°C.

Observamos que al alcanzar las temperaturas mínimas, las placas de PCM tienen una temperatura superior a la del invernadero.

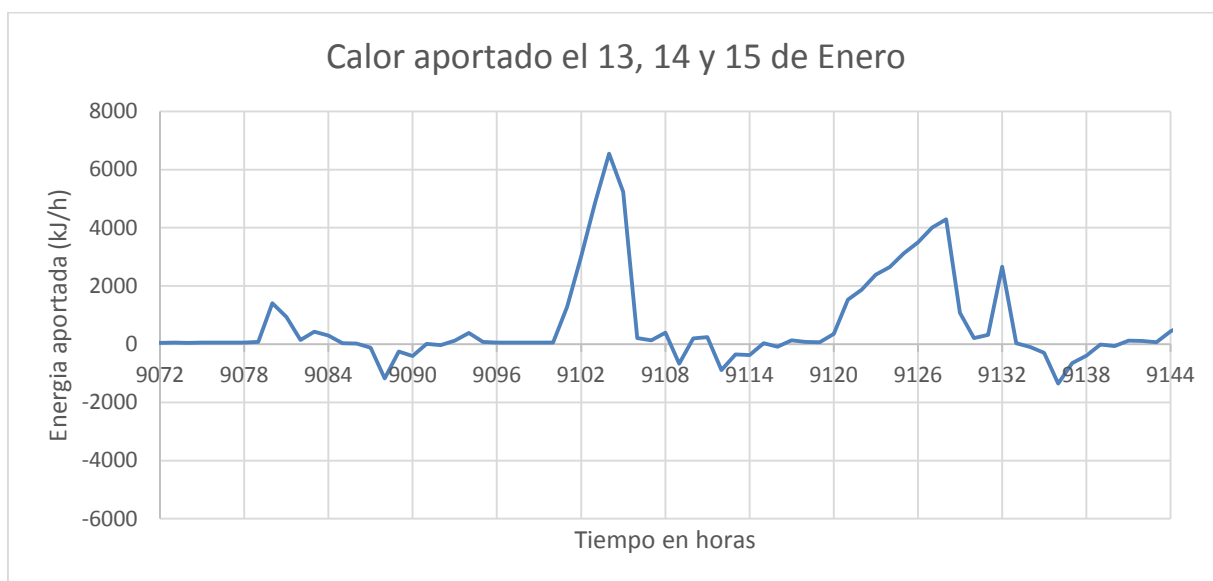


Figura 123. Calor aportado por las placas de PCM de 8°C entre las horas 9072-9144.

Sin embargo hay que destacar que dado que la temperatura de cambio de fase es muy baja, en este caso los días que no llegamos a bajar a temperaturas cercanas a los 8°C, no tenemos ninguna aportación de calor. En el gráfico de arriba podemos ver como en el día 13 de Enero apenas hay aportación de calor, dado que no se llega a las temperaturas de actuación del PCM. Por tanto no sacaríamos partido de la instalación de climatización, actuando esta solo para los casos más extremos.

A continuación se muestra la aportación de calor total de las placas y la tabla de temperaturas comparando el modelo actual con el modelo sin placas.

Tabla 58. Aportación de calor por la placa de PCM de 8°C.

Fechas simulación	PCM 8°C	
	5640-12384	5640-13104
calor desprendido (kJ)	9.89E+05	1.10E+06
calor absorbido (kJ)	-9.91E+05	-1.11E+06

Tabla 59. Temperaturas y RH con la placa de PCM de 8°C y sin PCM.

Fechas simulación	PCM 8°C		Sin PCM	
	5640-12384	5640-13104	5640-12384	5640-13104
Horas T > 26°	366	523	368	525
Horas T > 28°	171	218	171	218
Horas T > 30°	86	93	86	93
Horas T < 12°	774	774	777	777
Horas T < 11°	403	403	408	408
Horas T < 10°	196	196	196	196
Horas T < 9°	70	70	70	70
Horas T < 8°	17	17	24	24
Horas RH > 80	2909	3137	2921	3150
Horas RH < 40	0	0	0	0

3 Análisis de los diversos modelos

A continuación nos disponemos a comparar el calor desprendido por cada tipo de placas debido a las condiciones climáticas de nuestro invernadero y a las temperaturas conseguidas. Al igual que en el análisis con el EAHE, centraremos el estudio hasta el 31 de mayo (hora 12384).

Realizaremos este análisis comparativo para encontrar la disposición más interesante para nuestros condicionantes climáticos.

Tabla 60. Calor absorbido / desprendido por las placas de PCM. Unidades en kJ.

Modelo	1 (PCM 18°C)	2 (PCM 11°C)	3 (PCM 9°C)	4 (PCM 8°C)
calor desprendido (kJ)	6.80E+06	1.85E+06	1.19E+06	9.89E+05
calor absorbido (kJ)	-6.80E+06	-1.85E+06	-1.19E+06	-9.91E+05

Tabla 61. Comparativa de temperaturas de las diversas placas de PCM probadas.

Modelo	Sin PCM	1 (PCM 18°C)	2 (PCM 11°C)	3 (PCM 9°C)	4 (PCM 8°C)
Horas T > 26°	368	367	366	366	366
Horas T > 28°	171	171	171	171	171
Horas T > 30°	86	86	86	86	86
Horas T < 12°	777	770	775	773	774
Horas T < 11°	408	400	368	401	403
Horas T < 10°	196	196	147	187	196
Horas T < 9°	70	70	56	57	70
Horas T < 8°	24	24	22	16	17
Horas RH > 80	2921	2856	2876	2904	2909
Horas RH < 40	0	0	0	0	0

En primer lugar, destacar que las ligeras variaciones que encontramos entre los valores de calor absorbido y desprendido para una misma placa son debidas al error propio de la desratización. En caso de reducir el time-step, hasta acercarnos el máximo posible al tiempo continuo, encontraríamos que el calor desprendido y absorbido es igual.

Observamos que el modelo que nos aporta más calor es el de las placas de 18°C, dado que son las que tienen mayor capacidad de almacenamiento de calor, y la temperatura de 18°C aparece en un mayor número de días, pese a que en muchos de estos no se llegue a bajar de los 12°C, no siendo necesaria aportación de calor. Sin embargo el modelo que nos aporta una mayor reducción en el número de horas por debajo de 8°C es el modelo 3, realizado con placas de PCM de 9°C.

Álvaro Rodríguez Almaraz

**Sistemas de climatización de bajo impacto ambiental
para invernaderos**

**Trabajo Fin de Máster
dirigido por el Dr. Joan Manel Vallès Rasquera**

Máster en Ingeniería Industrial

Anexo 4. Descripción de los types



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2017

Índice del anexo de descripción de los types

1	Ecuación	6
2	Weather data	7
2.1	Outputs destacados.....	7
2.1.1	Temperatura ambiente.....	7
2.1.2	Temperatura del cielo	7
2.1.3	Humedad relativa	7
2.1.4	Presión atmosférica.....	7
2.1.5	Angulo del zenit solar.....	7
2.1.6	Angulo del azimut solar	7
2.1.7	Radiación total para la superficie estipulada	7
2.1.8	Radiación total en la superficie indicada.....	7
2.1.9	Radiación horizontal de onda corta.....	7
2.1.10	Radiación de onda corta en la superficie indicada.....	8
2.1.11	Angulo de incidencia horizontal.....	8
2.1.12	Angulo de incidencia en la superficie indicada	8
2.1.13	Día del año	8
2.1.14	Reflectancia del suelo	8
3	Type 56	9
3.1	Inputs	9
3.1.1	Temperatura ambiente.....	9
3.1.2	Humedad relativa	9
3.1.3	Temperatura del cielo	9
3.1.4	Temperatura del cielo	9
3.1.5	Angulo del zenit solar.....	9
3.1.6	Angulo del azimut solar	9
3.1.7	Reflexión del suelo.....	9
3.1.8	Temperatura del suelo	9
3.1.9	Brillo.....	10
3.1.10	Evapotranspiración	10
3.1.11	Tasa de renovación.....	10
3.1.12	QType997	10
3.1.13	Caudal Type997	10
3.1.14	Temperatura Type997.....	10
3.1.15	RH Type997.....	10
3.1.16	Fp.....	10
3.2	Outputs.....	10

	3.2.1 T Air	10
	3.2.2 Q sens	11
	3.2.3 RH.....	11
	3.2.4 QSoltr	11
4	Type 517	12
5	Type 1502.....	13
	5.1 Parámetros.....	13
	5.1.1 Banda muerta.....	13
	5.1.2 Oscilaciones permitidas	13
	5.2 Inputs	13
	5.2.1 Temperatura del fluido.....	13
	5.2.2 Temperatura set-point	13
	5.3 Outputs.....	13
	5.3.1 Señal del controlador para calentamiento.....	13
6	Type 1503.....	14
	6.1 Parámetros.....	14
	6.1.1 Banda muerta.....	14
	6.1.2 Oscilaciones permitidas	14
	6.2 Inputs	14
	6.2.1 Temperatura del fluido.....	14
	6.2.2 Temperatura set-point	14
	6.3 Outputs.....	14
	6.3.1 Señal del controlador para calentamiento.....	14
7	Type 14h	15
8	Type 25d	16
9	Type 65a	17
10	Type 65d	18
11	Type 77	19
	11.1 Parámetros.....	19
	11.1.1 Temperatura media	19
	11.1.2 Amplitud de la temperatura de la superficie	19
	11.1.3 Tiempo de inicio	19
	11.1.4 Conductividad térmica del suelo.....	19
	11.1.5 Densidad del suelo	19
	11.1.6 Calor específico del suelo	19
	11.1.7 Profundidad del punto.....	19
	11.2 Outputs.....	20
	11.2.1 Temperatura del punto	20

12	Type 112b.....	20
	12.1 Parámetros.....	20
	12.1.1 Caudal másico.....	20
	12.1.2 Potencia.....	20
	12.1.3 Eficiencia del motor.....	20
	12.2 Inputs.....	20
	12.2.1 Temperatura del aire de entrada.....	20
	12.2.2 Humedad relativa.....	20
	12.2.3 Caudal másico de aire.....	20
	12.2.4 Señal de control.....	21
	12.2.5 Presión a la entrada.....	21
	12.3 Outputs.....	21
	12.3.1 Temperatura del aire de salida.....	21
	12.3.2 Humedad relativa.....	21
	12.3.3 Consumo energético.....	21
	12.3.4 Presión a la salida.....	21
13	Type 997.....	22
	13.1 Parámetros destacados.....	22
	13.1.1 Parámetros del intercambiador.....	22
	13.1.2 Parámetros del fluido de intercambio.....	23
	13.1.3 Parámetros del suelo.....	23
	13.2 Inputs.....	24
	13.2.1 Temperatura de entrada.....	24
	13.2.2 Caudal de entrada.....	24
	13.3 Outputs.....	25
	13.3.1 Temperatura del fluido de salida.....	25
	13.3.2 Ratio de energía liberado.....	25
	13.3.3 Caudal de salida.....	25
14	Type 33e.....	26
	14.1 Inputs.....	26
	14.1.1 Temperatura de bulbo seco.....	26
	14.1.2 Humedad relativa.....	26
	14.1.3 Presión.....	26
	14.2 Outputs.....	26
	14.2.1 Densidad del aire.....	26
15	Type 189.....	27
	15.1 Parámetros.....	27
	15.1.1 K.....	27

15.1.2	Densidad	27
15.1.3	Espesor	27
15.1.4	Cp sensible	27
15.1.5	Rango de fusión	27
15.1.6	Entalpia	27
15.1.7	T fusión	27
15.1.8	Nº placas	27
15.2	Inputs	28
15.2.1	T aire	28
15.3	Outputs	28
15.3.1	Q	28
15.3.2	T superficial	28

El siguiente anexo explica el funcionamiento de los tipos utilizados. Destacar que algunos de ellos son muy polivalentes y explicaremos la parte que ha sido utilizada para generar los modelos Trnsys vistos anteriormente.

En la estructura de todos los tipos podemos destacar 3 apartados por el que se controla la información:

- Parámetros
- Inputs
- Outputs

A continuación se explicaran los elementos principales a tener en cuenta para comprender el funcionamiento de los diversos modelos.

1 Ecuación

Este type permite realizar ecuaciones a partir de los inputs que se le añadan. Se pueden combinar diversos inputs para realizar los cálculos deseados, y a partir de estos, permite generar los outputs deseados.

Se trata de un output completamente abierto, donde podemos generar funciones al gusto, con las operaciones matemáticas que se consideren necesarias.

2 Weather data

Archivo que contiene los datos climáticos de la localización a estudiar.

2.1 Outputs destacados

2.1.1 Temperatura ambiente

Temperatura del bulbo seco del lugar al time-step utilizado.

2.1.2 Temperatura del cielo

Temperatura efectiva del cielo para radiación de onda corta.

2.1.3 Humedad relativa

Humedad relativa del aire en porcentaje.

2.1.4 Presión atmosférica

Presión atmosférica del lugar y al time-step utilizado.

2.1.5 Angulo del zenit solar

Ángulo con la posición del zenit solar.

2.1.6 Angulo del azimut solar

Ángulo con la posición del azimut solar.

2.1.7 Radiación total para la superficie estipulada

Radiación total que incide sobre la superficie horizontal a lo largo del día, con el time-step estipulado.

2.1.8 Radiación total en la superficie indicada

Calcula la radiación total para diversos ángulos a lo largo del día. Se combinan diversos ángulos de forma que se pueda calcular posteriormente en el Type56 la radiación que incide sobre cada superficie.

2.1.9 Radiación horizontal de onda corta

Componente de onda corta de la radiación horizontal total.

2.1.10 Radiación de onda corta en la superficie indicada

Calcula la radiación de onda corta para diversos ángulos a lo largo del día. Se combinan diversos ángulos de forma que se pueda calcular posteriormente en el Type56 la radiación que incide sobre cada superficie.

2.1.11 Angulo de incidencia horizontal

Angulo de incidencia entre el haz de radiación de onda corta y la superficie horizontal.

2.1.12 Angulo de incidencia en la superficie indicada

Angulo de incidencia entre el haz de radiación de onda corta y la superficie indicada. Utilizada para calcular la radiación que llega a cada una de las superficies del Type56 y así calcular la radiación total incidente dentro del type56.

2.1.13 Día del año

Número del día del año del calendario juliano.

2.1.14 Reflectancia del suelo

Reflexión del suelo bajo ciertas condiciones. Interactúa con el Type56.

3 Type 56

Se trata del invernadero que modelamos. Pese a tener unos inputs marcados específicos, para calcular la radiación total incidente sobre el invernadero, la temperatura interior o la humedad relativa, se pueden añadir inputs, de forma que modelemos gains o funciones que afecten al desarrollo de la simulación, modelando actividades que se lleven a cabo en su interior o los efectos propios que tienen, en este caso, el cultivo de tomate sobre la evolución climática del invernadero.

3.1 Inputs

3.1.1 Temperatura ambiente

Temperatura exterior

3.1.2 Humedad relativa

Humedad relativa exterior

3.1.3 Temperatura del cielo

Temperatura efectiva del cielo para radiación de onda corta.

3.1.4 Temperatura del suelo

Temperatura efectiva del suelo para el intercambio de radiación de onda larga.

3.1.5 Angulo del zenit solar

Ángulo con la posición del zenit solar. Tomado del weather data.

3.1.6 Angulo del azimut solar

Ángulo con la posición del azimut solar. Tomado del weather data.

3.1.7 Reflexión del suelo

Reflexión del suelo debido a la sombra de la radiación difusa.

3.1.8 Temperatura del suelo

Se calcula mediante el Type77 y se utiliza para calcular las pérdidas de calor a través del suelo.

3.1.9 Brillo

Calculado a partir de la radiación horizontal de onda corta

3.1.10 Evapotranspiración

Input a partir del cual añadimos el efecto de la evapotranspiración calculado.

3.1.11 Tasa de renovación

Input creado para añadir una función (generada mediante el type14h, schedules y ecuaciones) por la cual se modelan las infiltraciones y la ventilación a lo largo del año y para las horas del día.

3.1.12 QType997

Input creado para añadir la aportación de calor o frío que tiene el EAHE cuando está en funcionamiento.

3.1.13 Caudal Type997

Input creado para añadir la aportación de calor o frío que tiene el EAHE cuando está en funcionamiento.

3.1.14 Temperatura Type997

Input creado para añadir la temperatura del corriente que proviene del EAHE. Se tiene en cuenta el calentamiento del aire que tiene el ventilador, situado en la impulsión.

3.1.15 RH Type997

Input creado para añadir la humedad relativa del corriente que proviene del EAHE.

3.1.16 Fp

Input por el cual se modela el factor de planta, el cual nos da la superficie del terreno que cubren las plantas. De esta forma en el type 56 podemos definir qué parte funciona con el coeficiente de absorción que tienen las tomateras y la parte de radiación que llega al suelo, para que utilice el coeficiente de absorción del suelo.

3.2 Outputs

3.2.1 T Air

Temperatura del aire interior del invernadero.

3.2.2Q_{sens}

Demanda de energía del invernadero. Valor negativo para calor y positivo para frío.

3.2.3RH

Humedad relativa en el interior del invernadero.

3.2.4Q_{Soltr}

Radiación total de onda corta exterior que pasa a través de las ventanas del invernadero. Valor que utilizamos para calcular la evapotranspiración.

4 Type 517

Schedule que permite establecer rutinas en las diversas franjas horarias para cada día.

Nos da la posibilidad de añadir un valor entre 0 y 1 para cada una de las 24 horas del día. A partir de estos valores, podemos insertar este type en una función, de forma que el resultado de esta varié a lo largo del día. Uno de los casos en los que se ha utilizado es para la obertura de las ventanas. Vinculado con un type 14h que, podemos generar una función donde para una determinada época del año, definamos a que horas se debe abrir y a cuales cerrar el invernadero.

5 Type 1502

Termostato para calentar.

5.1 Parámetros

5.1.1 Banda muerta

Banda muerta de temperaturas de acción del controlador. En este controlador, los efectos de histéresis se pueden modelar especificando un valor distinto de cero para este parámetro. Se supone que el punto de ajuste está centrado en las bandas muertas (control encendido cuando la temperatura es inferior al punto de consigna - banda muerta/2 y se apaga cuando la temperatura es mayor que el punto de consigna + banda muerta/2).

Siguiendo las recomendaciones de Trnsys, se marca una banda muerta de 2°C.

5.1.2 Oscilaciones permitidas

El número de oscilaciones del estado del controlador permitido en un tiempo antes de que la salida se fije y la solución encontrada. Si el número de oscilaciones se establece en un número impar, el control puede rebotar entre dos estados de control para temporizaciones sucesivas. Si el número de oscilaciones se establece en un número par, el sistema de control puede permanecer más tiempo en un régimen que el previsto.

Siguiendo las recomendaciones de Trnsys se marca un valor de 5 oscilaciones permitidas.

5.2 Inputs

5.2.1 Temperatura del fluido

Temperatura del fluido monitorizado por el controlador. Se trata de la temperatura interior del invernadero.

5.2.2 Temperatura set-point

En este caso es la temperatura a partir de la cual deseamos que se activen los sistemas de aportación de calor. Marcada en 12°C.

5.3 Outputs

5.3.1 Señal del controlador para calentamiento

La señal de control para el calentamiento de la etapa: 1 = calentamiento es necesario en esta etapa, 0 = el calentamiento no es necesario en esta etapa.

6 Type 1503

Termostato para enfriar.

6.1 Parámetros

6.1.1 Banda muerta

Banda muerta de temperaturas de acción del controlador. En este controlador, los efectos de histéresis se pueden modelar especificando un valor distinto de cero para este parámetro. Se supone que el punto de ajuste está centrado en las bandas muertas (control encendido cuando la temperatura es inferior al punto de consigna - banda muerta/2 y se apaga cuando la temperatura es mayor que el punto de consigna + banda muerta/2).

Siguiendo las recomendaciones de Trnsys, se marca una banda muerta de 2°C.

6.1.2 Oscilaciones permitidas

El número de oscilaciones del estado del controlador permitido en un tiempo antes de que la salida se fije y la solución encontrada. Si el número de oscilaciones se establece en un número impar, el control puede rebotar entre dos estados de control para temporizaciones sucesivas. Si el número de oscilaciones se establece en un número par, el sistema de control puede permanecer más tiempo en un régimen que el previsto.

Siguiendo las recomendaciones de Trnsys se marca un valor de 5 oscilaciones permitidas.

6.2 Inputs

6.2.1 Temperatura del fluido

Temperatura del fluido monitorizado por el controlador. Se trata de la temperatura interior del invernadero.

6.2.2 Temperatura set-point

En este caso es la temperatura a partir de la cual deseamos que se activen los sistemas de aportación de frío. Marcada en 28°C.

6.3 Outputs

6.3.1 Señal del controlador para calentamiento

La señal de control para el calentamiento de la etapa: 1 = enfriamiento es necesario en esta etapa, 0 = el enfriamiento no es necesario en esta etapa.

7 Type 14h

Permite asignar valores a lo largo del tiempo de simulación. Muy útil para vincular con otros types mediante el generador de ecuaciones.

En una simulación transitoria muchas veces es necesario utilizar una función forzada dependiente del tiempo que tiene un comportamiento caracterizado por un patrón repetido en el tiempo. El patrón de la función de forzado se establece mediante un conjunto de puntos de datos discretos que indican el valor de la función en varios momentos a lo largo de un ciclo. Se proporciona interpolación lineal para generar una función de forzado continuo a partir de los datos discretos. El ciclo se repite cada N horas donde N es el último valor de tiempo especificado. Mientras que el código de Type14 es totalmente general, esta versión del componente utiliza unidades adimensionales para que también pueda ser utilizado de una manera muy genérica.

8 Type 25d

Permite imprimir los valores deseados a lo largo de la simulación en un archivo .txt. Nos dará los valores con el periodo del time-step indicado.

9 Type 65a

Permite imprimir los valores deseados a lo largo de la simulación en un archivo .txt. Nos dará los valores con el periodo del time-step indicado. Además, nos genera una ventana donde se pueden ver los resultados de la simulación.

10 Type 65d

Genera una ventana donde se pueden ver los resultados de la simulación. No genera ningún archivo.

11 Type 77

Type de suelo que nos permite conocer la temperatura a la profundidad deseada. Se basa en la ecuación de Kusuda.

11.1 Parámetros

11.1.1 Temperatura media

La temperatura media de la superficie del suelo durante el año. La temperatura de la tierra a una profundidad infinita será esta temperatura. Esta temperatura suele ser la media anual de la temperatura del aire para la ubicación dada.

11.1.2 Amplitud de la temperatura de la superficie

Amplitud de la temperatura de la superficie a lo largo de un año.

11.1.3 Tiempo de inicio

La diferencia de tiempo en días entra el inicio del año y el día con la temperatura mínima del suelo. Consideramos el día 1 de febrero como el de mínima temperatura del suelo.

11.1.4 Conductividad térmica del suelo

Conductividad térmica del suelo del que se quiere conocer la temperatura. En esta simulación se utiliza un valor de $3.6\text{kJ/hr}\cdot\text{m}\cdot\text{K}$ para todos los suelos.

11.1.5 Densidad del suelo

Densidad del suelo del que se quiere conocer la temperatura. Consideramos un valor de densidad media para los diferentes estratos del suelo. En todos los casos en esta simulación se ha utilizado un valor de 1130kg/m^3 .

11.1.6 Calor específico del suelo

Calor específico del suelo del que se quiere conocer la temperatura. . En todos los casos en esta simulación se ha utilizado un valor de $1.06\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$.

11.1.7 Profundidad del punto

La profundidad del suelo en la que la temperatura del nodo desea ser evaluada. Se utilizará 0 para la superficie.

11.2 Outputs

11.2.1 Temperatura del punto

Temperatura del suelo a la profundidad especificada.

12 Type 112b

Ventilador. En nuestro modelo solo encontramos uno, en el que se suma la potencia y caudal de los 4 ventiladores a instalar en la realidad.

Está situado en la impulsión del type 997.

12.1 Parámetros

12.1.1 Caudal másico

Caudal másico de aire que pasa a través del ventilador durante la operación.

12.1.2 Potencia

Consumo de potencia del ventilador durante la operación.

12.1.3 Eficiencia del motor

Eficiencia del motor. Utilizada para calcular la cantidad de calor que se añade al corriente de aire.

12.2 Inputs

12.2.1 Temperatura del aire de entrada

Temperatura de entrada del aire que pasa a través del ventilador. Utilizamos la temperatura de salida del type 997 (el EAHE).

12.2.2 Humedad relativa

Humedad relativa del aire que pasa a través del ventilador.

Al recircular constantemente el aire de dentro de la casa a través del EAHE, es el mismo valor que el de la humedad relativa que tenemos dentro del invernadero.

12.2.3 Caudal másico de aire

Utilizamos el mismo caudal que pasa por el EAHE.

12.2.4 Señal de control

Se trata de input que indica si el ventilador funciona o no. 0 para ventilador parado y 1 para ventilador en funcionamiento.

Se modela una función que nos de este input a través de los termostatos.

12.2.5 Presión a la entrada

Presión del aire previa a entrar al ventilador

12.3 Outputs

12.3.1 Temperatura del aire de salida

La temperatura del aire después de pasar por el ventilador.

12.3.2 Humedad relativa

Humedad relativa del aire tras pasar por el ventilador.

12.3.3 Consumo energético

Consumo energético del ventilador durante su operación. Se calcula mediante el tiempo que está en funcionamiento y su potencia.

El tiempo de funcionamiento considerado depende del time-step marcado. Si durante cualquier franja de tiempo está conectado, contará que ha estado en funcionamiento durante el total de esta. Por tanto, para calcular de forma exacta el consumo energético debe reducirse el time-step.

Si en una franja se activase el ventilador durante dos minutos debido a una baja demanda de calor, nos aparecerá que el consumo ha sido igual al time-step que utilizábamos (por ejemplo, 1 hora) multiplicado por la potencia del ventilador.

12.3.4 Presión a la salida

Presión el aire tras pasar por el ventilador.

13 Type 997

Este type es el que incorpora el intercambiador tierra aire. Mediante él le damos a Transys todas las características del intercambiador, del flujo de aire y del suelo con el que se intercambia el calor.

13.1 Parámetros destacados

Dentro del apartado de parámetros, los separaremos en una serie de subapartados en función de que parte estemos describiendo y si es posible variar esta para dimensionar el equipo.

13.1.1 Parámetros del intercambiador

A la hora de dimensionar el Type una serie de parámetros del EAHE. Algunos de los que piden son para variar el método de cálculo, añadiendo nodos o buscando una mayor convergencia, o marcando algún método de cálculo predeterminado, en función de si queremos estimar algunos valores mediante funciones típicas, o si disponemos de valores reales tomados en campo. A continuación destacamos los que se refieren a la disposición y geometría del intercambiador.

13.1.1.1 Numero de tubos

Deseamos que toda la superficie del invernadero este llena de tubos, por ello este parámetro está limitado por las cotas de nuestro invernadero y por la distancia mínima a mantener entre tubos. La hipótesis inicial es la siguiente:

- 38 tubos de diámetro 0.25m.

En función de los resultados se realizarán simulaciones con distintos números de tubos.

13.1.1.2 Numero de capas de tubos

Se partirá de una simulación con 1 sola capa, solo si la aportación de calor fuese insuficiente, se consideraría la opción de aumentar el número de capas.

13.1.1.3 Longitud de los tubos

En la disposición actual de los tubos, que los colocamos en paralelo a la largo de la cara larga del invernadero (la de 38 metros) instalamos tubos de 23 metros.

13.1.1.4 Diámetro interior y exterior de los tubos

Tubos de diámetro exterior 250mm, con diámetro interior de 234mm. También se plantea la opción de probar con tubos de diámetros exterior 630mm y interior de 582.4mm.

13.1.1.5 Conductividad térmica del material de los tubos

Dado que se utilizan tubos de Polipropileno, estos tienen una conductividad de 0.792 kJ/hr·m·K.

13.1.1.6 Separación entre tubos

Trnsys nos obliga a mantener una separación mínima superior a 4 veces el diámetro del tubo (separación entre centros). Por ello iremos al límite y daremos una separación de 1.001 metros entre tubos, para poder instalar los 0.25m.

13.1.1.7 Profundidad de los tubos

Siguiendo las recomendaciones de fabricantes y diversos artículos, utilizamos 2 metros de profundidad.

13.1.2 Parámetros del fluido de intercambio

13.1.2.1 Calor específico

Utilizamos como calor específico del aire $1.005\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$, el caudal tiene el aire a una Temperatura de 300K , pero que utilizamos para todo el rango de temperaturas en las que trabajamos.

13.1.2.2 Densidad del fluido

Tomamos la densidad del aire a 300K , de 1.177kg/m^3 .

13.1.2.3 Conductividad térmica del fluido

Conductividad térmica del aire de $0.09612\text{kJ}/(\text{hr}\cdot\text{m}\cdot\text{K})$ a 300K .

13.1.2.4 Viscosidad del fluido

Conductividad térmica del aire de $0.0000182\text{ kg/m}\cdot\text{hr}$ a 300K .

13.1.3 Parámetros del suelo

13.1.3.1 Método de cálculo de la temperatura del suelo

Trnsys nos permite tres modos de cálculo para las temperaturas del suelo.

- Realizando balances energéticos con los diversos elementos que intervienen (intercambio de calor con los tubos, radiación sobre el suelo, temperatura ambiente y de la zona térmica...).
- Mediante la ecuación de Kusuda.
- Introduciendo la temperatura de la superficie como un Input.

En nuestro caso escogemos utilizar la ecuación de Kusuda para modelar la temperatura del suelo, dado que no tenemos suficiente información para crear un modelo adecuado con los otros métodos.

13.1.3.2 Conductividad térmica del suelo

Obtenemos el valor de la conductividad térmica de la publicación del ministerio de industria, turismo y comercio de "Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos" [12]. Escogemos el valor de Tierra seca, que consideramos el más similar al que pueda tener nuestro suelo al estar situado en El Ejido, el cual podemos ver en la Figura 33. Conductividad térmica de algunos tipos de suelo, K_s [12].

13.1.3.3 Densidad del suelo

Para obtener la densidad del suelo, se aconseja realizar un muestreo del suelo de nuestro invernadero. Como en este caso no se ha podido obtener tal información, se utilizan datos de la Tesis Doctoral "Aplicaciones de la energía solar al tratamiento térmico de suelos de invernadero" [32], y en la que se realizan estudios de los suelos típicos de los invernaderos de la zona.

En este caso se utiliza una densidad de 1130kg/m^3 .

13.1.3.4 Calor específico del suelo

Utilizando datos de la Tesis anterior [32] se utiliza un calor específico del suelo de 1.06kJ/(kg·K).

13.1.3.5 Temperatura del terreno profundo (Temperatura media del clima)

En primer lugar, para Trnsys considera el terreno profundo aquel en el que ya no hay ningún tipo de variación de temperatura a lo largo del año. En este caso, y basándonos tanto en las hipótesis de los artículos vistos como en la ayuda de Trnsys, se utiliza la temperatura media anual, de 18.49°C.

13.1.3.6 Amplitud de la temperatura de la superficie del terreno

Es la diferencia entre la temperatura máxima y mínima mensual del invernadero. Dado que esta debemos aplicarla antes de realizar las simulaciones, realizamos una suposición, reduciendo el ΔT que tenemos fuera del invernadero, de 13.6°C a 8°C para el suelo interior del invernadero.

13.1.3.7 Día de menor temperatura superficial

Siguiendo la ecuación de Kusuda, debe darse el mínimo para que defina la función sinusoidal. Establecemos el día 1 de Febrero como el de menor temperatura de la superficie.

13.1.3.8 Emisividad del suelo

Obtenemos el valor de emisividad a partir de la tabla que encontramos en la publicación del ministerio de industria, turismo y comercio de "Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos" [12], la cual podemos ver en la Figura 35. Valores de albedo para las diferentes superficies de suelo [12].

En este caso se utiliza la emisividad de la capa superior del terreno. En la tabla mostrada vemos los tipos de superficies típicos que se pueden encontrar en los invernaderos.

Utilizamos el valor para arena seca, de 0.18. Destacar que debido a no conocer con exactitud el tipo de suelo, podría ser que tuviésemos arena seca, de valor 0.18, que no difiere significativamente del valor adoptado.

13.1.3.9 Absorvidad del suelo

Calculamos el valor del coeficiente de absorción a partir de la expresión

$$\alpha_{sue} = 1 - \rho_{sue} = 1 - 0.18 = 0.82 \quad (14)$$

Por tanto utilizamos el valor de emisividad anterior, obteniendo una absorvidad de 0.82.

13.2 Inputs

13.2.1 Temperatura de entrada

Lo conectamos a la temperatura de salida de la casa, el cual colocamos en la impulsión, para añadir el incremento de temperatura que experimenta el corriente en su paso por el ventilador.

13.2.2 Caudal de entrada

Lo conectamos al caudal de salida del ventilador, que a su vez hemos fijado como un parámetro en este, en función de las velocidades que deseemos tener en los tubos. Los caudales se calcularán mediante la siguiente ecuación:

$$Q \left(\frac{kg}{h} \right) = \pi \cdot \frac{\varnothing_{int}^2}{4} (m^2) \cdot v_{tubo} \left(\frac{m}{s} \right) \cdot \frac{3600s}{1h} \cdot \frac{1.293kg}{1m^3} \cdot n_{tubos}^o \quad (15)$$

En este caso hemos puesto la densidad del aire para 25°C, aunque mediante una ecuación calculamos el caudal con la densidad en función de las condiciones del aire del invernadero. Para ello utilizamos el type 33e, el cual nos permite hacer un seguimiento de la densidad del aire en función de la temperatura, humedad relativa y presión interior del invernadero.

13.3 Outputs

13.3.1 Temperatura del fluido de salida

Temperatura del fluido a la salida del equipo en.

13.3.2 Ratio de energía liberado

Trnsys lo define como la velocidad a la que la energía sale del intercambiador de calor de tierra a través del flujo de fluido menos la velocidad a la que la energía entra en el intercambiador de calor de tierra a través del flujo de fluido. Lo utilizamos como la tasa de Energía enviada del fluido al suelo mediante el intercambiador de calor de tierra, con la cual conocemos el intercambio de calor realizado entre el fluido y el equipo. (kJ/h)

13.3.3 Caudal de salida

Cantidad de fluido que sale del equipo en kg/hr. Es el mismo valor que el de entrada.

14 Type 33e

Permite conocer la densidad del aire a partir de su temperatura, presión y humedad relativa.

Se utiliza para conocer la densidad del aire que entra al EAHE.

14.1 Inputs

14.1.1 Temperatura de bulbo seco

Temperatura del interior del invernadero.

14.1.2 Humedad relativa

Humedad relativa del aire del interior del invernadero.

14.1.3 Presión

Presión del aire del interior del invernadero.

14.2 Outputs

14.2.1 Densidad del aire

Densidad del aire del interior del invernadero y que va a entrar al EAHE.

15 Type 189

Permite modelar el comportamiento de una placa de PCM a partir de la temperatura ambiente y las propiedades de este.

15.1 Parámetros

15.1.1 K

Conductividad del aire, en $W/(m \cdot K)$. Utilizamos un valor de 0.2.

15.1.2 Densidad

Densidad de la placa de PCM.

15.1.3 Espesor

Espesor de la placa de PCM en m. Se parte de un espesor de 15mm, valor típico para este tipo de placas.

15.1.4 Cp sensible

Calor sensible de la placa de PCM.

15.1.5 Rango de fusión

Rango de temperaturas entre las que tenemos el cambio de fase del PCM.

15.1.6 Entalpia

Entalpia de cambio de fase del PCM.

15.1.7 T fusión

Temperatura nominal de fusión del PCM. Se refiere a aquella temperatura en la que la entalpia de fusión es máxima.

15.1.8 N° placas

Número de placas utilizadas en el modelo.

15.2 Inputs

15.2.1 T aire

Temperatura del aire que rodea la placa de PCM. Utilizamos la temperatura del interior del invernadero la cual nos proporciona el type 56.

15.3 Outputs

15.3.1 Q

Potencia térmica desprendida por la placa en W/m^2 . Deberá multiplicarse este valor por el número de placas utilizadas.

15.3.2 T superficial

Temperatura de la superficie de la placa de PCM.

Álvaro Rodríguez Almaraz

**Sistemas de climatización de bajo impacto ambiental
para invernaderos**

**Trabajo Fin de Máster
dirigido por el Dr. Joan Manel Vallès Rasquera**

Máster en Ingeniería Industrial

Anexo 5. Presupuestos



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2017

Índice de Presupuestos

1	Excavación con tubos AWADUKT Thermo.....	2
1.1	Cuadro de precios 1	2
1.2	Cuadro de precios 2	5
1.3	Presupuesto y mediciones.....	8
1.4	Resumen de presupuesto.....	11
2	Presupuesto con tubos normales.....	12
2.1	Cuadro de precios 1	12
2.2	Cuadro de precios 2	15
2.3	Presupuesto y mediciones.....	18
2.4	Resumen de presupuesto.....	21
3	Presupuesto bomba de calor.....	22
3.1	Cuadro de precios 1	22
3.2	Cuadro de precios 2	23
3.3	Presupuesto y mediciones.....	24
3.4	Resumen de presupuesto.....	25
4	Presupuesto placas PCM.....	26
4.1	Cuadro de precios 1	26
4.2	Cuadro de precios 2	27
4.3	Presupuesto y mediciones.....	28
4.4	Resumen de presupuesto.....	29

1 Excavación con tubos AWADUKT Thermo

1.1 Cuadro de precios 1

CUADRO DE PRECIOS 1

Instalación EAHE Tubos AWADUKT THERMO

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C1 Excavación			
E001	m3	Metro cúbico de excavación Metro cúbico de excavación de zanja en terreno compacto mediante medios mecánicos con extracción de tierra al borde pero sin transporte al vertedero.	11.52
ONCE EUROS con CINCUENTA Y DOS CÉNTIMOS			
E002	m3	Transporte al vertedero de los residuos generados Transporte al vertedero de los residuos limpios de tierra obtenidos tras instalar el intercambiador de calor tierra aire	182.10
CIENTO OCHENTA Y DOS EUROS con DIEZ CÉNTIMOS			

CUADRO DE PRECIOS 1

Instalación EAHE Tubos AWADUKT THERMO

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C2 Instalación Tubos			
E003	m	Conducto geotérmico de calor tierra-aire Conducto geotérmico intercambiador de calor aire-tierra de polipropileno, modelo AWADUKT "Thermo", de 250 mm de diámetro, enterrado, para acoplar a un sistema de ventilación.	57.52
CINCUENTA Y SIETE EUROS con CINCUENTA Y DOS CÉNTIMOS			
E004	m	Colectores Colector para conducto geotérmico intercambiador de calor aire-tierra de polipropileno, modelo AWADUKT "Thermo", de 630 mm de diámetro.	107.52
CIENTO SIETE EUROS con CINCUENTA Y DOS CÉNTIMOS			
E005	u	Codos Codos para colectores de AWADUKT "Thermo" de 630mm de diámetro.	307.98
TRESIENTOS SIETE EUROS con NOVENTA Y OCHO CÉNTIMOS			
E006	u	Aspiración Torre de aspiración y accesorios necesarios para conducto geotérmico.	1,201.60
MIL DOSCIENTOS UN EUROS con SESENTA CÉNTIMOS			
E007	u	Recogida condensados Elementos auxiliares para la recogida de condensados que se dan en el intercambiador enterrado.	400.31
CUATROCIENTOS EUROS con TREINTA Y UN CÉNTIMOS			

CUADRO DE PRECIOS 1

Instalación EAHE Tubos AWADUKT THERMO

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C3 Ventiladores			
E008		Ventiladores helicoidales murales	271.74
Ventiladores helicoidales murales de la casa S & P, modelo HXM-350.			
DOSCIENTOS SETENTA Y UN EUROS con SETENTA Y CUATRO CÉNTIMOS			

1.2 Cuadro de precios 2

CUADRO DE PRECIOS 2

Instalación EAHE Tubos AWADUKT THERMO

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C3 Ventiladores			
E001	m3	Metro cúbico de excavación Metro cúbico de excavación de zanja en terreno compacto mediante medios mecánicos con extracción de tierra al borde pero sin transporte al vertedero.	
			Mano de obra6.02
			Maquinaria.....5.50
			TOTAL PARTIDA11.52
E002	m3	Transporte al vertedero de los residuos generados Transporte al vertedero de los residuos limpios de tierra obtenidos tras instalar el intercambiador de calor tierra aire	
			Mano de obra6.50
			Maquinaria.....22.60
			Resto de obra y materiales153.00
			TOTAL PARTIDA182.10

CUADRO DE PRECIOS 2

Instalación EAHE Tubos AWADUKT THERMO

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C2 Instalación Tubos			
E003	m	Conducto geotérmico de calor tierra-aire Conducto geotérmico intercambiador de calor aire-tierra de polipropileno, modelo AWADUKT "Thermo", de 250 mm de diámetro, enterrado, para acoplar a un sistema de ventilación.	
		Mano de obra	7.52
		Resto de obra y materiales	50.00
		TOTAL PARTIDA	57.52
E004	m	Colectores Colector para conducto geotérmico intercambiador de calor aire-tierra de polipropileno, modelo AWADUKT "Thermo", de 630 mm de diámetro.	
		Mano de obra	7.52
		Resto de obra y materiales	100.00
		TOTAL PARTIDA	107.52
E005	u	Codos Codos para colectores de AWADUKT "Thermo" de 630mm de diámetro.	
		Mano de obra	7.52
		Resto de obra y materiales	300.46
		TOTAL PARTIDA	307.98
E006	u	Aspiración Torre de aspiración y accesorios necesarios para conducto geotérmico.	
		Mano de obra	7.60
		Resto de obra y materiales	1,194.00
		TOTAL PARTIDA	1,201.60
E007	u	Recogida condensados Elementos auxiliares para la recogida de condensados que se dan en el intercambiador enterrado.	
		Resto de obra y materiales	400.31
		TOTAL PARTIDA	400.31

CUADRO DE PRECIOS 2

Instalación EAHE Tubos AWADUKT THERMO

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C3 Ventiladores			
E008		Ventiladores helicoidales murales	
		Ventiladores helicoidales murales de la casa S & P, modelo HXM-350.	
			Mano de obra6.00
			Resto de obra y materiales265.74
			TOTAL PARTIDA271.74

1.3 Presupuesto y mediciones

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Instalación EAHE Tubos AWADUKT THERMO

CÓDIGO	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO C1 Excavación				
E001	m3 Metro cúbico de excavación Metro cúbico de excavación de zanja en terreno compacto mediante medios mecánicos con extracción de tierra al borde pero sin transporte al vertedero.			
		1,500.00	11.52	17,280.00
E002	m3 Transporte al vertedero de los residuos generados Transporte al vertedero de los residuos limpios de tierra obtenidos tras instalar el intercambiador de calor tierra aire			
		1.50	182.10	273.15
TOTAL CAPÍTULO C1 Excavación				17,553.15

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Instalación EAHE Tubos AWADUKT THERMO

CÓDIGO	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO C2 Instalación Tubos				
E003	m Conducto geotérmico de calor tierra-aire Conducto geotérmico intercambiador de calor aire-tierra de polipropileno, modelo AWADUKT "Thermo", de 250 mm de diámetro, enterrado, para acoplar a un sistema de ventilación.			
		874.00	57.52	50,272.48
E004	m Colectores Colector para conducto geotérmico intercambiador de calor aire-tierra de polipropileno, modelo AWADUKT "Thermo", de 630 mm de diámetro.			
		72.00	107.52	7,741.44
E005	u Codos Codos para colectores de AWADUKT "Thermo" de 630mm de diámetro.			
		8.00	307.98	2,463.84
E006	u Aspiración Torre de aspiración y accesorios necesarios para conducto geotérmico.			
		4.00	1,201.60	4,806.40
E007	u Recogida condensados Elementos auxiliares para la recogida de condensados que se dan en el intercambiador enterrado.			
		4.00	400.31	1,601.24
TOTAL CAPÍTULO C2 Instalación Tubos.....				66,885.40

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Instalación EAHE Tubos AWADUKT THERMO

CÓDIGO	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO C3 Ventiladores				
E008	Ventiladores helicoidales murales			
	Ventiladores helicoidales murales de la casa S & P, modelo HXM-350.	4.00	271.74	1,086.96

TOTAL CAPÍTULO C3 Ventiladores.....1,086.96

TOTAL85,525.51

1.4 Resumen de presupuesto

RESUMEN DE PRESUPUESTO

Instalación EAHE Tubos AWADUKT THERMO

CAPITULO	RESUMEN	EUROS	%
C1	Excavación.....	17,553.15	20.52
C2	Instalación Tubos.....	66,885.40	78.21
C3	Ventiladores.....	1,086.96	1.27
TOTAL PRESUPUESTO GENERAL			85,525.51

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de OCHENTA Y CINCO MIL QUINIENTOS VEINTICINCO EUROS con CINCUENTA Y UN CÉNTIMOS

Tarragona, a 1 de Septiembre de 2017.

El promotor

La dirección facultativa

Fundación "Cajamar"

Álvaro Rodríguez Almaraz

2 Presupuesto con tubos normales

2.1 Cuadro de precios 1

CUADRO DE PRECIOS 1

Instalación EAHE Tubos polipropileno normales

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C1 Excavación			
E001	m3	Metro cúbico de excavación Metro cúbico de excavación de zanja en terreno compacto mediante medios mecánicos con extracción de tierra al borde pero sin transporte al vertedero.	11.52
ONCE EUROS con CINCUENTA Y DOS CÉNTIMOS			
E002	m3	Transporte al vertedero de los residuos generados Transporte al vertedero de los residuos limpios de tierra obtenidos tras instalar el intercambiador de calor tierra aire	182.10
CIENTO OCHENTA Y DOS EUROS con DIEZ CÉNTIMOS			

CUADRO DE PRECIOS 1

Instalación EAHE Tubos polipropileno normales

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C2 Instalación Tubos			
E003	m	Conducto geotérmico de calor tierra-aire	9.92
		Conducto geotérmico intercambiador de calor aire-tierra de polipropileno de 250 mm de diámetro, enterrado, para acoplar a un sistema de ventilación.	
NUEVE EUROS con NOVENTA Y DOS CÉNTIMOS			
E004	m	Colectores	25.02
		Colector para conducto geotérmico intercambiador de calor aire-tierra de polipropileno de 630 mm de diámetro.	
VEINTICINCO EUROS con DOS CÉNTIMOS			
E005	u	Codos	227.98
		Codos para colectores de 630mm de diámetro.	
DOSCIENTOS VEINTISIETE EUROS con NOVENTA Y OCHO CÉNTIMOS			
E006	u	Aspiración	1,201.60
		Torre de aspiración y accesorios necesarios para conducto geotérmico.	
MIL DOSCIENTOS UN EUROS con SESENTA CÉNTIMOS			
E007	u	Recogida condensados	400.31
		Elementos auxiliares para la recogida de condensados que se dan en el intercambiador enterrado.	
CUATROCIENTOS EUROS con TREINTA Y UN CÉNTIMOS			

CUADRO DE PRECIOS 1

Instalación EAHE Tubos polipropileno normales

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C3 Ventiladores			
E008		Ventiladores helicoidales murales	271.74
Ventiladores helicoidales murales de la casa S & P, modelo HXM-350.			
DOSCIENTOS SETENTA Y UN EUROS con SETENTA Y CUATRO CÉNTIMOS			

2.2 Cuadro de precios 2

CUADRO DE PRECIOS 2

Instalación EAHE Tubos polipropileno normales

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C1 Excavación			
E001	m3	Metro cúbico de excavación Metro cúbico de excavación de zanja en terreno compacto mediante medios mecánicos con extracción de tierra al borde pero sin transporte al vertedero.	
			Mano de obra6.02
			Maquinaria.....5.50
			TOTAL
		11.52
PARTIDA			
E002	m3	Transporte al vertedero de los residuos generados Transporte al vertedero de los residuos limpios de tierra obtenidos tras instalar el intercambiador de calor tierra aire	
			Mano de obra6.50
			Maquinaria.....22.60
			Resto de obra y materiales153.00
			TOTAL PARTIDA182.10

CUADRO DE PRECIOS 2

Instalación EAHE Tubos polipropileno normales

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C2 Instalación Tubos			
E003	m	Conducto geotérmico de calor tierra-aire Conducto geotérmico intercambiador de calor aire-tierra de polipropileno de 250 mm de diámetro, enterrado, para acoplar a un sistema de ventilación.	
			Mano de obra5.92
			Resto de obra y materiales4.00
			TOTAL PARTIDA9.92
E004	m	Colectores Colector para conducto geotérmico intercambiador de calor aire-tierra de polipropileno de 630 mm de diámetro.	
			Mano de obra7.52
			Resto de obra y materiales17.50
			TOTAL PARTIDA25.02
E005	u	Codos Codos para colectores de 630mm de diámetro.	
			Mano de obra7.52
			Resto de obra y materiales220.46
			TOTAL PARTIDA227.98
E006	u	Aspiración Torre de aspiración y accesorios necesarios para conducto geotérmico.	
			Mano de obra7.60
			Resto de obra y materiales1,194.00
			TOTAL PARTIDA1,201.60
E007	u	Recogida condensados Elementos auxiliares para la recogida de condensados que se dan en el intercambiador enterrado.	
			Resto de obra y materiales400.31
			TOTAL PARTIDA400.31

CUADRO DE PRECIOS 2

Instalación EAHE Tubos polipropileno normales

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C3 Ventiladores			
E008		Ventiladores helicoidales murales	
		Ventiladores helicoidales murales de la casa S & P, modelo HXM-350.	
			Mano de obra6.00
			Resto de obra y materiales265.74
			TOTAL PARTIDA271.74

2.3 Presupuesto y mediciones

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Instalación EAHE Tubos polipropileno normales

CÓDIGO	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO C1 Excavación				
E001	m3 Metro cúbico de excavación Metro cúbico de excavación de zanja en terreno compacto mediante medios mecánicos con extracción de tierra al borde pero sin transporte al vertedero.			
		1,500.00	11.52	17,280.00
E002	m3 Transporte al vertedero de los residuos generados Transporte al vertedero de los residuos limpios de tierra obtenidos tras instalar el intercambiador de calor tierra aire			
		1.50	182.10	273.15
TOTAL CAPÍTULO C1 Excavación				17,553.15

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Instalación EAHE Tubos polipropileno normales

CÓDIGO	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO C2 Instalación Tubos				
E003	m Conducto geotérmico de calor tierra-aire Conducto geotérmico intercambiador de calor aire-tierra de polipropileno de 250 mm de diámetro, enterrado, para acoplar a un sistema de ventilación.			
		874.00	9.92	8,670.08
E004	m Colectores Colector para conducto geotérmico intercambiador de calor aire-tierra de polipropileno de 630 mm de diámetro.			
		72.00	25.02	1,801.44
E005	u Codos Codos para colectores de 630mm de diámetro.			
		8.00	227.98	1,823.84
E006	u Aspiración Torre de aspiración y accesorios necesarios para conducto geotérmico.			
		4.00	1,201.60	4,806.40
E007	u Recogida condensados Elementos auxiliares para la recogida de condensados que se dan en el intercambiador enterrado.			
		4.00	400.31	1,601.24
TOTAL CAPÍTULO C2 Instalación Tubos.....				18,703.00

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Instalación EAHE Tubos polipropileno normales

CÓDIGO	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO C3 Ventiladores				
E008	Ventiladores helicoidales murales			
	Ventiladores helicoidales murales de la casa S & P, modelo HXM-350.	4.00	271.74	1,086.96

TOTAL CAPÍTULO C3 Ventiladores.....1,086.96

TOTAL37,343.11

2.4 Resumen de presupuesto

RESUMEN DE PRESUPUESTO

Instalación EAHE Tubos polipropileno normales

CAPITULO	RESUMEN	EUROS	%
C1	Excavación.....	17,553.15	47.01
C2	Instalación Tubos.....	18,703.00	50.08
C3	Ventiladores.....	1,086.96	2.91
TOTAL PRESUPUESTO GENERAL		37,343.11	

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de TREINTA Y SIETE MIL TRESCIENTOS CUARENTA Y TRES EUROS con ONCE CÉNTIMOS

Tarragona, a 1 de Septiembre de 2017.

El promotor

La dirección facultativa

Fundación "Cajamar"

Álvaro Rodríguez Almaraz

3 Presupuesto bomba de calor

3.1 Cuadro de precios 1

CUADRO DE PRECIOS 1

Instalación Bomba de calor equivalente

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C1 Bomba de calor 11.2kW			
E009B	u	Bomba de calor 11.2kW Bomba de calor Mitsubishi con capacidad calorífica nominal entre 16 y 11.2kW y capacidad máxima entre 17.26 y 12.37kW.	8,025.00
OCHO MIL VEINTICINCO EUROS			

3.2 Cuadro de precios 2

CUADRO DE PRECIOS 2

Instalación Bomba de calor equivalente

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C1 Bomba de calor 11.2kW			
E009B	u	Bomba de calor 11.2kW Bomba de calor Mitsubishi con capacidad calorífica nominal entre 16 y 11.2kW y capacidad máxima entre 17.26 y 12.37kW.	
			Mano de obra195.00
			Resto de obra y materiales7,830.00
			TOTAL PARTIDA8,025.00

3.3 Presupuesto y mediciones

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Instalación Bomba de calor equivalente

CÓDIGO	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO C1 Bomba de calor				
E009B	u Bomba de calor 11.2kW Bomba de calor Mitsubishi con capacidad calorífica nominal entre 16 y 11.2kW y capacidad máxima entre 17.26 y 12.37kW.	1.00	8,025.00	8,025.00

TOTAL CAPÍTULO C1 Bomba de calor8,025.00

TOTAL8,025.00

3.4 Resumen de presupuesto

RESUMEN DE PRESUPUESTO

Instalación Bomba de calor equivalente

CAPITULO	RESUMEN	EUROS	%
C1	Bomba de calor	8,025.00	100.00
TOTAL PRESUPUESTO GENERAL			8,025.00

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de OCHO MIL VEINTICINCO EUROS

Tarragona, a 1 de Septiembre de 2017.

El promotor

La dirección facultativa

Fundación "Cajamar"

Álvaro Rodríguez Almaraz

4 Presupuesto placas PCM

4.1 Cuadro de precios 1

CUADRO DE PRECIOS 1

Instalación placas PCM

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C1 Placas PCM Rubitherm			
E010	u	Placas PCM RubiTherm RT9 Placas de material de cambio de fase con temperatura de fusión de 9°C.	5.00
E011	u	Soportes para placas PCM Soportes para placas de PCM con coste de instalación incluido.	CINCO EUROS 0.80
			CERO EUROS con OCHENTA CÉNTIMOS

4.2 Cuadro de precios 2

CUADRO DE PRECIOS 2

Instalación placas PCM

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO C1 Placas PCM Rubitherm			
E010	u	Placas PCM RubiTherm RT9 Placas de material de cambio de fase con temperatura de fusión de 9°C.	
		Resto de obra y materiales	5.00
		TOTAL PARTIDA	5.00
E011	u	Soportes para placas PCM Soportes para placas de PCM con coste de instalación incluido.	
		Mano de obra	0.30
		Resto de obra y materiales	0.50
		TOTAL PARTIDA	0.80

4.3 Presupuesto y mediciones

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Instalación placas PCM

CÓDIGO	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO C1 Placas PCM Rubitherm				
E010	u Placas PCM RubiTherm RT9 Placas de material de cambio de fase con temperatura de fusión de 9°C.			
		550.00	5.00	2,750.00
E011	u Soportes para placas PCM Soportes para placas de PCM con coste de instalación incluido.			
		550.00	0.80	440.00
TOTAL CAPÍTULO C1 Placas PCM Rubitherm.....				3,190.00
TOTAL				3,190.00

4.4 Resumen de presupuesto

RESUMEN DE PRESUPUESTO

Instalación placas PCM

CAPITULO	RESUMEN	EUROS	%
C1	Placas PCM Rubitherm.....	3,190.00	100.00
TOTAL PRESUPUESTO GENERAL			3,190.00

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de TRES MIL CIENTO NOVENTA EUROS

Tarragona, a 1 de Septiembre de 2017.

El promotor

La dirección facultativa

Fundación "Cajamar"

Álvaro Rodríguez Almaraz