

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
MASTER OFICIAL EN **E**ficiencia **E**nergética

Autor: Jorge Abián Santana López

**La radiación como factor determinante en la temperatura
interior de los edificios en Canarias**

Tutor: Gabriel Winter Althaus

Cotutor: Jose Antonio Sosa Díaz-Saavedra

Las Palmas de Gran Canaria, 19 de Diciembre

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, por su total dedicación e implicación con el presente Trabajo Final de Máster de principio a fin.

A mi cotutor, por el impulso y motivación a desarrollar este tema de estudio en concreto.

A mi familia, particularmente a mis padres por su labor incansable y apoyo incondicional a lo largo de mi trayectoria académica.

Las soluciones aplicadas a la construcción en Canarias están determinadas fundamentalmente por el factor de temperatura exterior, factor tomado directamente de soluciones constructivas adoptadas del Código Técnico de la Edificación que son efectivas para latitudes más al norte del territorio canario. El objetivo del trabajo se centra en demostrar que estas soluciones son incorrectas para nuestra latitud puesto que la radiación contribuye más que la temperatura exterior y, dichas soluciones constructivas no contemplan esta importante variable.

El trabajo se divide en tres partes: Una primera parte de toma de valores de radiación durante un año típico en Canarias. Una segunda parte de análisis de estos datos donde se demuestre que la radiación condiciona más la temperatura interior de los ambientes en la latitud indicada para Canarias. Y, por último, una simulación mediante el software "FreeFem", con diferentes tipos de cubierta que sirvan como herramienta durante la fase de proyecto, que nos aporte con precisión valores de temperatura interior tras analizar diferentes variables de radiación, temperatura exterior, conductividad térmica de los materiales y tipo de solución adoptada.

En definitiva, no deja de ser una reflexión sobre las debilidades del CTE en su aplicación a climas subtropicales y una búsqueda de medidas de arquitectura pasiva que permitan una reducción en la utilización de los sistemas activos de refrigeración y calefacción.

ÍNDICE

NOMENCLATURA	6
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Planteamiento general del trabajo	8
1.2. Método simplificado del CTE	8
1.3. Comparativa método simplificado del CTE y método a través de la radiación global	10
1.4. Objetivos	13
1.5. Metodología	14
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	14
2.1. Termodinámica y calor	14
2.1.1. Sistema termodinámico	15
2.1.2. Conductividad térmica	16
2.1.3. Calor	17
2.2. Modos de transmisión de calor	18
2.3. Conducción	18
2.4. Convección	20
2.5. Radiación	21
2.6. Factores que influyen en la radiación	23
2.7. Propiedades de los materiales relacionadas con la radiación	24
2.8. Convección y radiación en paralelo	26
3. ESTUDIO COMPARATIVO DE CUBIERTAS	27
3.1. Contexto y localización	27
3.2. Toma de valores de radiación para el día más desfavorable en Canarias	28
3.3. Radiación y temperatura interior ambiente ideal. Carta bioclimática de Olygay	28
3.4. Tipos de cubierta y materiales empleados	30
4. MODELO Y SIMULACIÓN DE LA CUBIERTA	35
4.1. Modelo físico y matemático	35

4.2. Cálculo de la influencia del espesor del forjado	39
4.3. Cálculo con diferentes posiciones del aislamiento térmico	43
4.4. Cálculo con diferentes espesores de la cámara ventilada	50
4.5. Cálculo de la cámara ventilada a través de las juntas del pavimento	59
4.6. Cálculo solución losa FILTRON	63
5. CONCLUSIONES	65
5.1. Resumen	65
5.2. Resultados y conclusiones	66
5.3. Comentarios finales	71
6. BIBLIOGRAFÍA	72
7. ANEXOS	73
7.1. Anexo I. Mallado de soluciones con Freefem	73
7.2. Anexo II. Datos de radiación para el mes de Junio	77
7.3. Anexo III. Datos de viento	80

NOMENCLATURA

Tipografía Romana

Símbolo	Definición	Unidades Sistema Internacional
c	Calor específico	J/kg K
C	Capacidad térmica	J/K
E	Energía interna por unidad de masa	J/Kg
E	Potencia emisiva de un cuerpo radiante	W/m ²
E_b	Potencia emisiva de un cuerpo negro	W/m ²
h_{cint}	Coefficiente de convección interior	W/m ²
h_{cext}	Coefficiente de convección exterior	W/m ²
G	Irradiancia global	W/m ²
k	Conductividad térmica	W/m K
M	Masa	Kg
q	Flujo de calor	W/m ²
R	Resistencia térmica	K/W
t	Tiempo	S
T	Temperatura	K o °C
T_o	Temperatura ambiente exterior	K o °C
T_{int}	Temperatura interior	K o °C
T_{cielo}	Temperatura de cielo	K o °C

Tipografía Griega

Símbolo	Definición	Unidades Sistema Internacional
α	Difusividad térmica	m^2/s
α_1	Absortancia térmica	m/s
δ	Diferencial	m/s
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W/m^2K^4
γ	Emisividad térmica	
τ	Transmisividad térmica	W/m^2K
ρ	Reflectancia	
ρ	Densidad del material	Kg/m^3
λ	Longitud de onda	m

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento general del trabajo

En la actualidad el consumo energético en los edificios llega a suponer del 30 al 40% de la energía total consumida en todo el planeta. Si a esto le sumamos los gastos existentes que conlleva la incorporación de un sistema de refrigeración, para enfriar o calentar el interior de la envolvente, el consumo se eleva en torno a un 40% del total.

Por tanto, es fundamental encontrar estrategias pasivas que refrigeren o disminuyan la temperatura interior de los edificios sin elevar el consumo energético. Un elemento directamente relacionado con la eficiencia térmica es la envolvente y, dentro de la misma, la cubierta juega un papel determinante al ser la más expuesta en el conjunto del edificio. Un buen diseño de la cubierta contribuye a un ahorro en el consumo de energía del edificio.

El Código Técnico de la Edificación es un manual básico y de aplicación inmediata en la resolución de este tipo de problemas, pero observamos una serie de incoherencias que en la mayoría de los casos dan como resultado soluciones erróneas.

Las soluciones aplicadas a la construcción en Canarias están determinadas fundamentalmente por el factor de temperatura ambiente exterior, factor tomado directamente de soluciones constructivas adoptadas del Código Técnico de la Edificación que son efectivas para latitudes más al norte del territorio canario.

El objetivo del trabajo se centra en demostrar que estas soluciones son incorrectas para nuestra latitud, puesto que la radiación contribuye más que la temperatura exterior al calentamiento del edificio y, dichas soluciones constructivas no siguen un método correcto para el cálculo de esta importante variable. Esta es la causa de que proyectos realizados en Canarias cumpliendo las especificaciones del CTE no alcancen la temperatura interior de confort indicada previamente durante la fase de proyecto.

1.2. Método simplificado del CTE

El Código Técnico de la Edificación realiza una clasificación en base a “climas de referencia”, es decir, un sistema que diferencia el territorio en zonas en función de la severidad del clima que afecta a cada una de ellas. Para la zonificación, se emplean 13 zonas climáticas que se identifican mediante una letra mayúscula (A-E) correspondientes con la severidad climática de invierno y números (1-4) correspondientes con la severidad climática de verano. Esta clasificación está

demasiado simplificada y trae consigo una serie de errores en las soluciones constructivas que son aptas para lugares con climas rotundamente distintos.

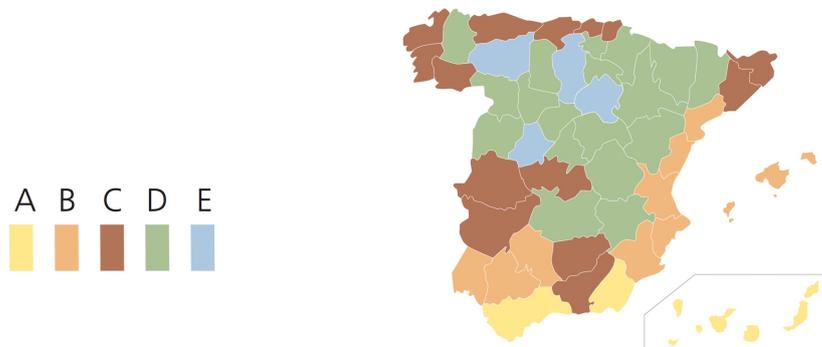


Figura 1.1: Mapa de España correspondiente a los climas de referencia [11]

Tras la última adaptación del CTE (30/07/2015) se ha incorporado una nueva clasificación para distinguir el particular clima que afecta a Canarias del resto del territorio, mediante la incorporación de una letra alfa de reciente aplicación en el CTE.



Figura 1.2: Mapa de España correspondiente a los climas de referencia [11]

Esta letra alfa intenta implantar la influencia de la irradiación mediante el cálculo del número de horas de sol relativas a cada mes en cada una de las comunidades. En este punto podemos observar como la normativa trata de afinar la severidad climática que le corresponde a cada lugar, pero aún no es suficiente. El número de horas de Sol dadas para cada posición de una latitud determinada omite ciertos condicionantes que son fundamentales para entender la radiación.

Estos condicionantes comprenden la absorptividad, la reflectancia y la transmitancia de los materiales, además de la radiación directa y la difusa (radiación horizontal que no se menciona en el CTE).

$$SCI = a \cdot GD + b \cdot \frac{n}{N} + c \cdot GD^2 + d \cdot \left(\frac{n}{N}\right)^2 + e$$

Expresión para obtener la severidad climática de invierno según CTE (1.1)

GD, es la suma de grados-día de invierno en base 20 para meses de Octubre a Mayo.

n/N, es el cociente entre número de horas de sol y el número de horas de sol máximas.

a,b,c,d, son los coeficientes de regresión.

1.3 Comparativa método simplificado del CTE y método a través de la radiación global

A continuación, se procederá a explicar el método de cálculo actual mediante una serie de ejemplos para contrastarlo con el método seguido en el algoritmo de estudio. Para ello se han escogido 5 ciudades con diferentes latitudes, entre ellas dos regiones subtropicales que serán las elegidas para buscar las soluciones en cubierta. Las regiones escogidas, ordenadas en función de su latitud son las siguientes:

-Tata	23°	13.5 horas
-San Bartolomé de Tirajana	27°	13.8 horas
-Cádiz	36°	14.6 horas
-Toledo	40°	15.0 horas
-Pamplona	43°	15.3 horas

■ NÚMERO DE HORAS DE SOL MÁXIMAS

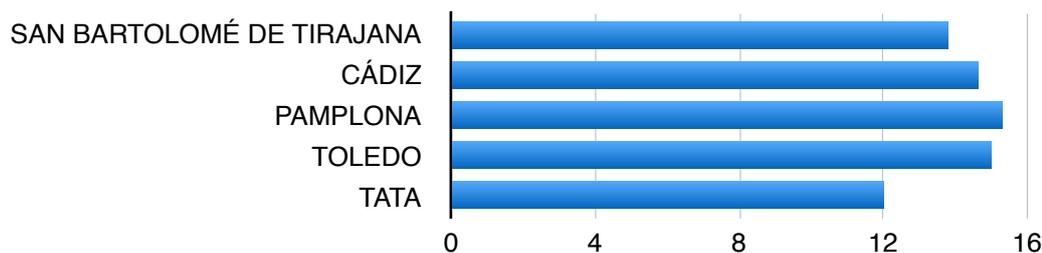


Figura 1.3: Número de horas de Sol máximas

Como se muestra, el número de horas de sol máximas aumenta a medida que nos alejamos del ecuador. Estos datos han sido extraídos de tabla mostrada en la figura 1.4.

Lat.º	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
N												
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
2	12.0	12.1	12.1	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.1	12.1	12.0	12.0
4	11.9	12.0	12.1	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.9
6	11.8	11.9	12.1	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12.2	12.0	11.9	11.8
8	11.7	11.9	12.1	12.3	12.5	12.6	12.5	12.4	12.2	12.0	11.8	11.7
10	11.6	11.8	12.1	12.3	12.6	12.7	12.7	12.5	12.2	11.9	11.7	11.5
12	11.5	11.7	12.0	12.4	12.7	12.8	12.8	12.5	12.2	11.9	11.6	11.4
14	11.4	11.7	12.0	12.4	12.8	12.9	12.9	12.6	12.2	11.8	11.5	11.3
16	11.3	11.6	12.0	12.5	12.9	13.1	13.0	12.7	12.2	11.8	11.4	11.2
18	11.2	11.5	12.0	12.5	13.0	13.2	13.1	12.8	12.3	11.8	11.3	11.1
19	11.1	11.5	12.0	12.6	13.0	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.3	11.0
20	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
21	11.0	11.4	12.0	12.6	13.1	13.4	13.3	12.9	12.3	11.7	11.2	10.9
22	10.9	11.4	12.0	12.6	13.2	13.5	13.4	12.9	12.3	11.7	11.1	10.8
23	10.9	11.4	12.0	12.7	13.2	13.5	13.4	13.0	12.3	11.7	11.1	10.7
24	10.8	11.3	12.0	12.7	13.3	13.6	13.5	13.0	12.3	11.6	11.0	10.7
25	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.6	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
26	10.7	11.3	12.0	12.7	13.4	13.8	13.6	13.1	12.3	11.6	10.9	10.5
27	10.6	11.2	12.0	12.8	13.5	13.8	13.7	13.1	12.4	11.6	10.8	10.5
28	10.5	11.2	12.0	12.8	13.5	13.9	13.8	13.2	12.4	11.5	10.8	10.4
29	10.5	11.2	11.9	12.8	13.6	14.0	13.8	13.2	12.4	11.5	10.7	10.3
30	10.4	11.1	11.9	12.9	13.6	14.1	13.9	13.3	12.4	11.5	10.7	10.2
31	10.3	11.1	11.9	12.9	13.7	14.1	14.0	13.3	12.4	11.5	10.6	10.2
32	10.3	11.0	11.9	12.9	13.8	14.2	14.1	13.4	12.4	11.4	10.6	10.1
33	10.2	11.0	11.9	13.0	13.8	14.3	14.1	13.4	12.4	11.4	10.5	10.0
34	10.1	10.9	11.9	13.0	13.9	14.4	14.2	13.5	12.4	11.4	10.4	9.9
35	10.0	10.9	11.9	13.0	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.4	10.4	9.8
36	10.0	10.9	11.9	13.1	14.0	14.6	14.4	13.6	12.5	11.3	10.3	9.7
37	9.9	10.8	11.9	13.1	14.1	14.7	14.5	13.6	12.5	11.3	10.2	9.6
38	9.8	10.8	11.9	13.1	14.2	14.8	14.6	13.7	12.5	11.3	10.2	9.6
39	9.7	10.7	11.9	13.2	14.3	14.9	14.7	13.7	12.5	11.3	10.1	9.5
40	9.6	10.7	11.9	13.2	14.4	15.0	14.8	13.8	12.5	11.2	10.0	9.4
41	9.5	10.6	11.9	13.3	14.4	15.1	14.9	13.9	12.5	11.2	9.9	9.3
42	9.4	10.6	11.9	13.3	14.5	15.2	15.0	13.9	12.5	11.2	9.9	9.1
43	9.3	10.5	11.8	13.3	14.6	15.3	15.1	14.0	12.6	11.1	9.8	9.0
45	9.1	10.4	11.8	13.4	14.8	15.6	15.3	14.1	12.6	11.1	9.6	8.8
46	9.0	10.3	11.8	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	11.0	9.5	8.7
47	8.9	10.3	11.8	13.5	15.0	15.9	15.6	14.3	12.6	11.0	9.4	8.5
48	8.8	10.2	11.8	13.6	15.1	16.0	15.7	14.4	12.7	10.9	9.3	8.4
49	8.7	10.1	11.8	13.6	15.2	16.2	15.8	14.5	12.7	10.9	9.2	8.3
50	8.5	10.1	11.8	13.7	15.4	16.3	16.0	14.6	12.7	10.9	9.1	8.1
51	8.4	10.0	11.8	13.8	15.5	16.5	16.1	14.6	12.7	10.8	9.0	8.0
52	8.2	9.9	11.8	13.8	15.6	16.7	16.3	14.7	12.7	10.8	8.9	7.8

Figura 1.4: Tabla números de horas de Sol máximas (h/día) para el hemisferio Norte [4]

Esta manera de operar no es correcta puesto que se omite un factor un fundamental que se convierte en el epicentro de la investigación, la radiación. Si seguimos este procedimiento

estamos incurriendo en un error, puesto que zonas más próximas al ecuador tienen menos horas de Sol máximas que las regiones más alejadas. Vamos a realizar el estudio de las mismas ciudades para contrastar los resultados:

-Tata	23°	1030 W/m²
-San Bartolomé de Tirajana	27°	954 W/m²
-Cádiz	36°	925 W/m²
-Toledo	40°	867 W/m²
-Pamplona	43°	724 W/m²

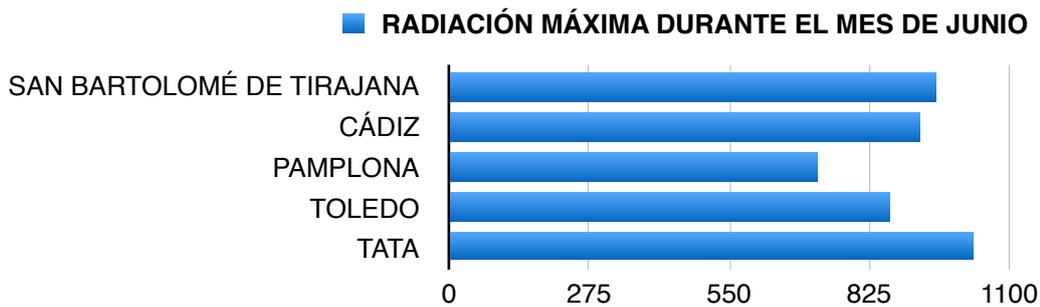


Figura 1.5: Máximo valor de radiación durante el mes de Junio a las 12.00 horas

Se observa en la figura 1.5 como son las regiones subtropicales las más afectadas por la radiación y, por tanto, se invierte el orden de la gráfica con respecto al número de horas solares máximas.

Hay que tener en cuenta, que se toman valores máximos durante el mes de Junio en la hora más desfavorable, pero este orden se sigue manteniendo durante todo el día y estudiando el año típico en cuanto a la irradiancia recibida, tal y como se muestra en la figura 1.6.

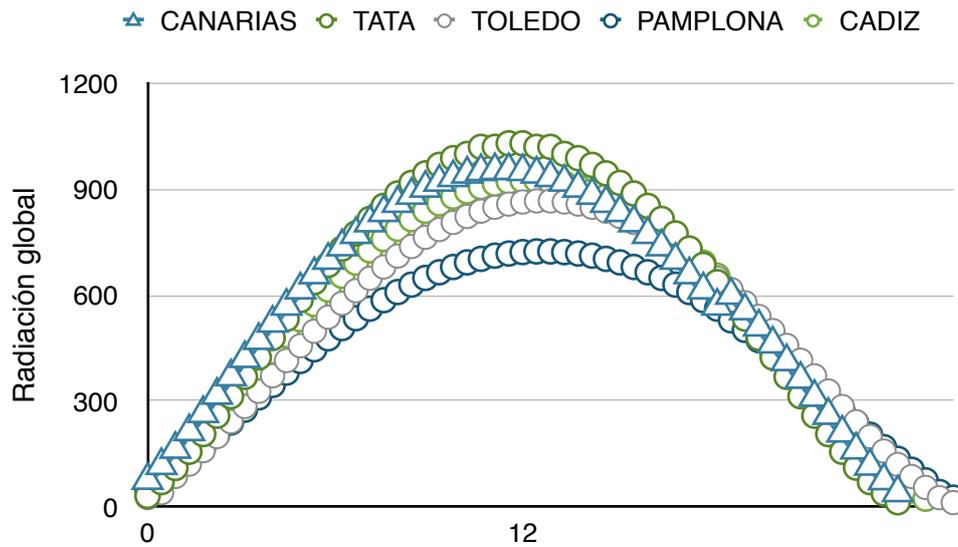


Figura 1.6: Media diaria de radiación durante el mes de Junio

Esto quiere decir que ciudades como Toledo o Pamplona, a pesar de tener más horas de Sol durante todo el día, reciben una menor cantidad de energía dado que las horas pico de radiación están muy por debajo de las horas pico obtenidas en Canarias, Cádiz o Tata.

1.4. Objetivos

El trabajo se centra en la simulación de diferentes soluciones en cubierta a partir de un modelo de transferencia de calor, que sirva como herramienta durante la fase de proyecto y que, nos permita conocer el comportamiento térmico de la misma.

Además, se desarrollan los siguiente objetivos secundarios:

- Razonamiento incorrecto por parte del CTE en la asignación de zonas climáticas.
- Análisis de la transferencia de temperatura desde el exterior al interior de diferentes soluciones en cubierta.
- Influencia del espesor en la cubierta.
- Análisis de diferentes posiciones del aislamiento en la cubierta.
- Ventajas de la cámara de aire y determinar el comportamiento del espesor.
- Soluciones para evitar la radiación y reducir la temperatura interior del edificio.

1.5. Metodología

Para el desarrollo del siguiente documento se han elaborado las siguientes partes:

1. Recopilación de valores de radiación durante el día más desfavorable en Canarias.
2. Análisis de estos datos donde se demuestre que la radiación condiciona más la temperatura interior de los ambientes en la latitud indicada para Canarias.
3. Estudio de la radiación en dos regiones subtropicales con altos valores de radiación.
4. Implementación del algoritmo mediante el software Freefem [5], aplicando datos de radiación a los métodos tradicionales estudiados por conducción y convección.
5. Simulación con diferentes tipos de cubierta que sirvan como herramienta de apoyo durante la fase de proyecto.
6. Obtención de resultados y análisis.
7. Conclusiones.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Termodinámica y el calor

La termodinámica trata de predecir el intercambio de energía que puede tener lugar entre dos cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. Esta transferencia de energía se define como calor. Esta ciencia pretende no solo explicar cómo la energía térmica puede ser transferida, sino también predecir la rapidez con la que, bajo ciertas condiciones específicas, tendrá lugar esa transferencia.

La termodinámica trata sistemas en equilibrio, por lo que puede usarse para predecir la cantidad de energía requerida para llevar un sistema desde un estado de equilibrio a otro. A continuación se exponen brevemente los principios de la termodinámica:

-El *Primer Principio de la Termodinámica* postula el principio de la conservación de la energía, donde la energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma. Se formula de la siguiente manera: $E = Q + W$, donde “E” es la energía interna del sistema, “Q” es la cantidad de calor aportado al sistema y “W” es el trabajo realizado por el sistema.

-El *Segundo Principio de la Termodinámica* establece cuál es la dirección en la que se producen los procesos termodinámicos. La experiencia ha demostrado que el calor se traslada de una región de mayor temperatura a otra de menor temperatura.

-El *Tercer Principio de la Termodinámica* fija un límite mínimo para la temperatura y la entropía. Tenemos que para un entorno macroscópico no es posible alcanzar la temperatura de cero absoluto.

En relación a la termodinámica se procede a definir una serie de conceptos base sobre los que acotar nuestro campo de actuación para el presente estudio:

2.1.1. Sistema termodinámico

Se denomina sistema termodinámico a aquella región del espacio objeto del estudio, que está separada del medio que la rodea por una superficie límite. Esta superficie límite determina el tipo de relación que se establece entre el sistema y su entorno, de modo que en función de la influencia de las variables de cambio de volumen, flujo de calor y flujo de materia determinaremos las características de los límites del sistema según la tabla que se expone a continuación:

	Sí	No
Cambio de forma	Móvil	Rígido
Flujo de calor	Diatérmico	Adiabático
Flujo de materia	Permeable	Impermeable

Figura 2.1: Clasificación de los límites del sistema [7]

Según el tipo de intercambio establecido entre el sistema y su entorno a través de sus límites, podemos clasificar los sistemas en tres tipos, abierto, cerrado y aislado tal y como se refleja en el siguiente dibujo.

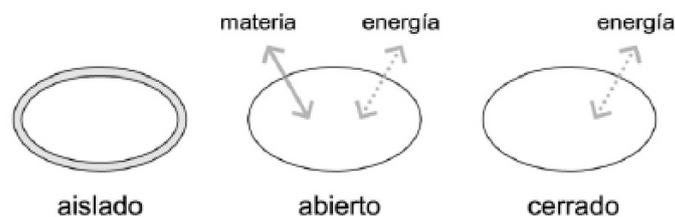


Figura 2.2: Media diaria de radiación durante el mes de Junio [7]

El sistema abierto permite el intercambio de materia y energía, el sistema cerrado solo puede intercambiar energía, y el sistema aislado no intercambia ni energía ni materia con sus alrededores.

Estos sistemas se encuentran en equilibrio cuando las variables que lo definen adquieren un valor constante en toda coordenada independiente al tiempo. Todo sistema tiende hacia el estado de equilibrio y una vez alcanzado se dan las siguientes condiciones:

- Equilibrio térmico: la temperatura es igual en todos los puntos del sistema.
- Equilibrio mecánico: la presión adquiere el mismo valor en todo punto.
- Equilibrio químico: la composición química es la misma en todos sus puntos.

En relación a los procesos termodinámicos cabe destacar que tienen lugar cuando en un sistema se modifican alguna de sus variables de estado y éstas van tomando diferentes valores según el tiempo. El sistema pasa de un estado inicial de equilibrio "A" a un estado de equilibrio "B", y en función de la variable (p, V, T) que permanezca constante se denomina el proceso como:

- Isobárico (p = constante)
- Isótero (V = constante)
- Isotérmico (T = constante)
- Adiabático (Q = 0)

Una transformación termodinámica puede ser reversible cuando toda la secuencia de estados intermedios desde "A" hasta "B" se han realizado existiendo equilibrio termodinámico entre el sistema y el entorno. Sin embargo, una evolución puede ser irreversible si no ha existido equilibrio fisicoquímico entre el sistema y el entorno.

2.1.2. Conductividad térmica

La conductividad térmica varía en función del medio de propagación. Para el estudio que nos concierne es necesario saber que la energía térmica en los sólidos puede transferirse por conducción mediante dos mecanismos: por vibración en red y por transporte de electrones libres. Viene expresada a través del flujo de calor por unidad de área proporcional siendo proporcional al gradiente normal de temperatura, según la siguiente ecuación:

$$q = -kA \frac{dT}{dx}$$

En buenos conductores térmicos se transporta energía desde una región de alta temperatura a otra de baja temperatura como en el caso de los gases. La energía también puede transmitirse como energía de vibración aunque no es tan efectivo como el proceso anterior.

2.1.3. Calor

La energía interna de un sistema puede ser modificada por medio de dos mecanismos, el trabajo realizado y el flujo de calor. Para el estudio que nos concierne vamos a analizar únicamente la variación de energía a partir de un flujo de calor.

Siempre que tengamos dos cuerpos entre los que exista una diferencia de temperatura se va a producir una transferencia de energía del cuerpo más caliente al más frío hasta que sus temperaturas se encuentren en equilibrio. Esta energía transferida de un cuerpo a otro en función de la temperatura se denomina calor. Por lo tanto, el fenómeno de calor se considera transitorio, y finaliza una vez que se alcanza el estado de equilibrio.

Como el calor es una forma de energía, las unidades de medida empleadas según el Sistema Internacional es el Julio (J), que se define como la cantidad necesaria de calor para elevar la temperatura de una gramo de agua de 14,5 a 15,5°C bajo la presión de una atmósfera. También se pueden expresar estas unidades en calorías (cal), que equivale a 4,186 Julios o en BTU (British Termal Unit).

Además, existen dos conceptos relacionados con el calor que son el calor específico y la capacidad calorífica de un sistema:

-Calor específico, es la cantidad de calor necesario para incrementar la temperatura de un gramo de material en un grado centígrado.

-Capacidad calorífica de un sistema, es la cantidad de calor que puede almacenar un sistema para aumentar su temperatura un grado centígrado. La expresión que permite evaluar la capacidad calorífica se obtiene a través de la siguiente expresión, donde m_i es la masa en gramos de los componentes que forman el sistema y C_e el calor específico tabulado para cada componente

$$C = \sum_{i=1}^n m_i \cdot c_e \quad (2.1.3.A)$$

La cantidad de calor que puede almacenar un sistema cuando pasa de una temperatura T_1 a otra temperatura T_2 , se obtiene de la siguiente manera:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} C \cdot dT = \int_{T_1}^{T_2} \left(\sum_{i=1}^n m_i \cdot c_{e_i} \right) \cdot dT \quad (2.1.3.B)$$

2.2. Modos de transmisión de calor

En todo sistema donde exista una diferencia de temperaturas se produce un flujo de calor que va desde la zona más caliente hacia la zona más fría, hasta que ambas entran en equilibrio. Los fenómenos de transmisión de calor se dividen en varios tipos, aunque generalmente se clasifican en tres tipos: conducción, convección y radiación. Cabe destacar, que lo más frecuente es la aparición de estos fenómenos combinados.

- a) Conducción: Se produce a través de un medio material cuando hay una transferencia de energía desde una región de alta temperatura a otra de baja temperatura. Se dice que existe un gradiente de temperatura y el flujo de calor por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura.
- b) Convección: El flujo de calor en una superficie depende de la rapidez a la que el fluido lleva el calor. Es decir, el flujo de calor está relacionado con la diferencia de temperaturas entre la pared y el fluido, y el área de la superficie. Existe un medio material.
- c) Radiación: Se da una transferencia de calor sin que exista un medio material cuando la temperatura del cuerpo es mayor a cero. Dicha radiación puede ser reflejada, absorbida o transmitida.

Además, es importante señalar que un proceso de transmisión de calor se clasifica en función de las variables que influyen en la temperatura, como son el tiempo y el espacio. Un flujo de calor se denomina **estacionario** o estado estable cuando su temperatura no varía con el tiempo, y no estacionario o **transitorio** si la temperatura no es constante. Si la temperatura varía en función de una, dos o tres coordenadas espaciales, tenemos que puede ser unidimensional, bidimensional o tridimensional respectivamente.

2.3. Conducción

Cuando en un cuerpo existe un gradiente de temperatura, la experiencia muestra que hay una transferencia de energía desde el punto de mayor temperatura hacia el de menor temperatura y viene expresado por la siguiente ecuación:

$$q / a = dt / dx$$

Cuando se introduce la constante de proporcionalidad:

$$q = - kA dt / dx$$

Donde q es el flujo de calor y dt / dx es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo del calor. La constante positiva k se llama conductividad térmica del material, y viene seguida por el signo menos para satisfacer el segundo principio de la termodinámica; el flujo debe fluir de la región de mayor temperatura a la región de menor temperatura. Esto se conoce como Ley de Fourier y, aplicada a un sólido de manera simplificada (fig. 2.3) puede describirse como:

Energía que entra por conducción a través de la cara izquierda + Calor generado en el interior del elemento = Variación de la energía interna + Energía que sale por conducción a través de la cara derecha

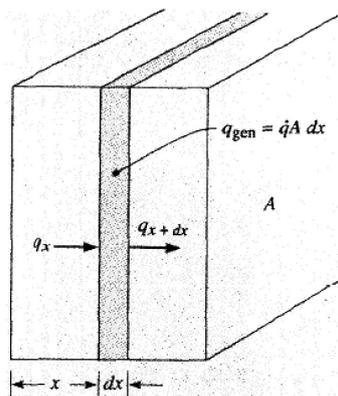


Figura 2.3: Volumen elemental para el análisis de la conducción de calor unidimensional [1]

2.4. Convección

El gradiente de temperaturas depende de la rapidez a la que el fluido se lleva el calor; una velocidad alta produce un gradiente de temperaturas grande, etc. Así pues, el gradiente de temperaturas en una pared depende del campo de velocidades, aunque conviene recordar que el mecanismo físico de la transferencia de calor en la pared es un proceso de conducción.

Para expresar el efecto global de la convección, se utiliza la ley de Newton de enfriamiento:

$$q_c = h_c A (T_p - T_\infty)$$

Aquí el flujo transferido se relaciona con la diferencia global de temperaturas entre la pared y el fluido, y el área A de la superficie. La magnitud h_c se denomina coeficiente de transferencia de calor por convección y viene definido por la figura 1, T_p es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura ambiente.

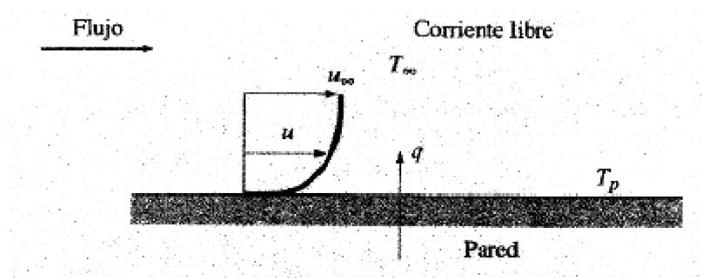


Figura 2.4: Transferencia de calor por convección desde una placa [1]

En numerosas situaciones se determina experimentalmente. Se expresa en vatios por metro cuadrado y por grado Celsius, cuando el flujo de calor se expresa en vatios. Como se aprecia en la figura 21 la transferencia de calor por convección dependerá de la viscosidad del fluido además de las propiedades térmicas del fluido (conductividad térmica, calor específico, densidad). Esto sucede porque la viscosidad influye en el perfil de velocidades y, por tanto, en el flujo de energía en la región próxima a la pared. En la tabla 1.2 se dan valores aproximados del coeficiente de transferencia de calor por convección.

La velocidad varía desde su valor inicial cero, que aparece sobre la superficie hasta un valor final u_∞ que se mantiene constante asociado al flujo. Esta variación de velocidades define el espesor de la capa límite. También podemos considerar como capa límite la formada por la variación de temperaturas que existe entre la superficie y el fluido, así tenemos la capa límite térmica.

Modo	h	
	W/m ² · °C	Btu/h · ft ² · °F
Convección natural, ΔT = 30 °C		
Placa vertical de 0,3 m [1 ft] de alto en aire	4,5	0,79
Cilindro horizontal de 5 cm de diámetro en aire	6,5	1,14
Cilindro horizontal de 2,5 cm de diámetro en agua	890	157
Transferencia de calor a través de un hueco vertical de 1,5 cm lleno de aire con ΔT = 60 °C	2,64	0,46
Convección forzada		
Corriente de aire a 2 m/s sobre placa cuadrada de 0,2 m de lado	12	2,1
Corriente de aire a 35 m/s sobre placa cuadrada de 0,75 m de lado	75	13,2
Aire a 2 atm circulando a 10 m/s por un tubo de 2,5 cm de diámetro	65	11,4
Agua a 0,5 m/s circulando por un tubo de 2,5 cm de diámetro	3.500	616
Corriente de aire transversal a un cilindro de 5 cm de diámetro con una velocidad de 50 m/s	180	32
Agua en ebullición		
En un recipiente	2.500-35.000	440-6.200
Circulando por un tubo	5.000-100.000	880-17.600
Condensación de vapor de agua, 1 atm		
Superficies verticales	4.000-11.300	700-2.000
En el exterior de tubos horizontales	9.500-25.000	1.700-4.400

Tabla 2.1. Valores aproximados de coeficientes de transferencia de calor por convección [1]

2.5. Radiación

La radiación térmica es una parte de la emisión electromagnética caracterizada por una emisión de luz o de calor. La radiación emitida puede originarse en forma de ondas cortas o en forma de ondas largas. La banda que corresponde a la radiación térmica se encuentra en un rango intermedio que oscila entre 0.1 y 100 micras (1 micra, μ , = $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$). El intercambio de calor entre dos cuerpos depende de la diferencia de temperatura elevada a la cuarta potencia. Otra diferencia significativa entre la radiación y otros tipos de propagación del calor es que no necesita un medio para propagarse.

La radiación que emite una superficie se origina a partir de la energía térmica de la materia que está limitada por su superficie, y la velocidad a la que libera esta energía por unidad de superficie, denominada potencia emisiva, y viene expresada por la Ley de Stefan-Boltzmann

$$E = \sigma T_s^4$$

donde T_s^4 es la temperatura absoluta en Kelvin de la superficie y σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$). Esta superficie se denomina radiador ideal o cuerpo negro.

Radiación de superficies ideales (negras)

Una superficie negra es una idealización basada en la respuesta de una superficie a la radiación térmica incidente. Cuando la radiación incide sobre un cuerpo homogéneo, parte de la energía penetra y otra parte sale reflejada. Una cantidad de radiación solar recibida se absorbe por el propio material, y la otra parte se transmite por el mismo, dependiendo no sólo de la absorptividad y transmisividad de sus superficies, sino de su relación geométrica con respecto a los rayos del sol, así como de las sombras y reflejos que se produzcan.

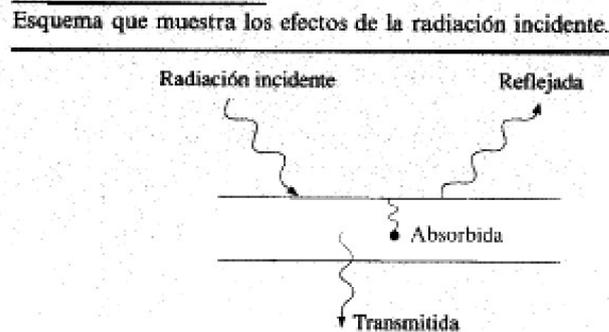


Figura 2.5: Transferencia de calor por convección desde una placa [1]

$$\rho + \alpha_1 + \tau = 1$$

donde ρ se define como la reflectividad, α_1 la absorptividad y τ como la transmisividad.

Se absorbe sólo una parte y depende del color y la geometría de la superficie receptora. La absorción será baja para colores claros. Una superficie blanca refleja bien las ondas visibles cortas y absorbe las radiaciones de onda larga, o sea refleja la radiación solar y absorbe las radiaciones emitidas por los cuerpos en el ambiente.

La reflexión puede ser de dos tipos: radiación **directa** o radiación **difusa**. La primera son los rayos directos del sol y la segunda, la radiación solar que se difunde en todas direcciones por efecto de los gases y las partículas contenidas en la atmósfera.

Por otro lado, la radiación solar, sea directa o difusa, puede llegar reflejada por las superficies cercanas, especialmente el suelo (término denominado albedo).

En un cuerpo negro toda la radiación es absorbida, por tanto, no existe nunca una reflexión. Otra característica importante de los cuerpos negros es que son perfectos emisores. Una vez alcanzado el estado de equilibrio, el cuerpo negro absorberá y emitirá la misma radiación.

Y por último, la radiación total emitida por un cuerpo negro está directamente relacionada con su temperatura.

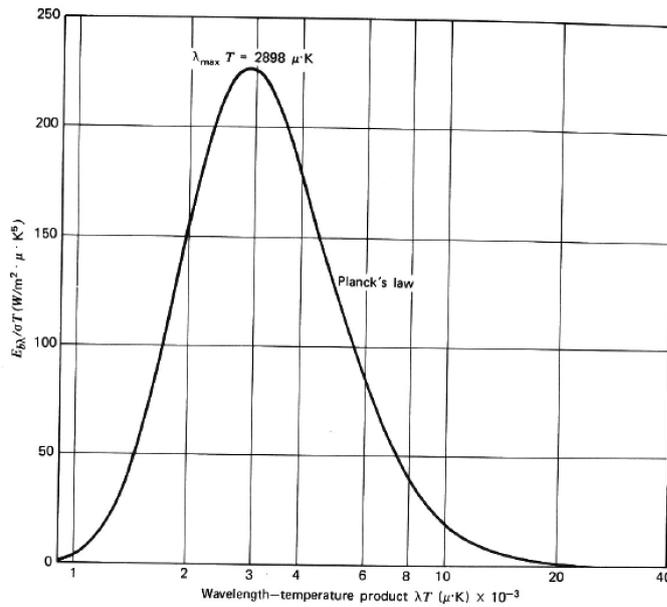


Figura 2.6: Emisión de un cuerpo negro en función de λT

Radiación de superficies no negras

Para entender el comportamiento de las superficies reales debemos compararlas con la situación ideal de “cuerpo negro”. Los factores que influyen en este tipo de superficies son la longitud de onda, la temperatura, el tipo de superficie, el ángulo de incidencia y la distribución espectral de la radiación incidente.

2.6. Factores que influyen en la radiación

Para el estudio de la radiación global hay que tener en cuenta los siguiente componentes expuestos a continuación:

Los niveles de radiación que alcanza una determinada superficie vienen condicionados por el ángulo cenital solar (hora del día, posición geográfica y época del año), el contenido total de ozono, la nubosidad, la altitud sobre el nivel del mar, los aerosoles, el albedo o reflectividad de la superficie y otros contaminantes gaseosos.

La nubosidad también juega un papel muy importante en el factor de la radiación. La nubosidad tiene un efecto plano sobre la radiación UV, de modo que atenúa el espectro en la misma medida

para todo el rango sin modificar la estructura espectral. Esta atenuación estará condicionada por el tipo de nube y su desarrollo.

La presencia de nubes y el contenido de humedad de la atmósfera hacen que la radiación solar disminuya, pero para el estudio que nos concierne se tomarán valores de radiación a cielo limpio y discriminando la humedad relativa, puesto que su cálculo complicaría la implementación del algoritmo.

Además de la humedad relativa, existe otra humedad que se deprecia dado que alargaría demasiado el presente trabajo, esta es, la cantidad de agua que es capaz de retener la cubierta. Dicha humedad, modifica el comportamiento de la cubierta de tres maneras:

- Modifica la inercia térmica del material puesto que cambia la densidad del material.
- Afecta a la evaporación de la cubierta ya que se produciría un enfriamiento evaporativo.
- Modifica la conductividad térmica, del mismo modo que sucede con la conductividad eléctrica.

2.7. Propiedades de los materiales relacionadas con la radiación

La radiación térmica es una parte de la emisión electromagnética caracterizada por una emisión de luz o de calor. La radiación emitida puede originarse en forma de ondas cortas o en forma de ondas largas. La banda que

La **emisividad** es la propiedad que indica la medida de como un cuerpo radiante emite energía en relación a un cuerpo negro. Esta emisividad se puede cuantificar mediante una fórmula que relacionan la superficie real con el área dA , temperatura T_a , por unidad de tiempo por un ángulo conocido, para un intervalo λ de longitud de onda. Para el desarrollo del algoritmo se tomarán emisividades conocidas aportadas por el fabricante del material de estudio.

La **absortividad** se define como una parte de la energía incidente que es absorbida por una superficie. La absortividad es una propiedad más compleja que la emisividad dado que depende de las características espectrales y direccionales de la radiación incidente y, al igual que en el caso anterior se tomará como un dato a efectos de simplificar el cálculo.

La **reflexividad** depende del ángulo de incidencia que llega a la superficie y las características direccionales de la energía reflejada. Para el estudio de las cubiertas descritas a continuación se calculará como el recíproco de la absortividad.

La mayoría de los cuerpos no metálicos tiene un coeficiente de absorción alto. Las superficies metálicas son malas absorbentes.

Si dos superficies una blanca y otra brillante son expuestas a la radiación solar ambas reflejarán y absorberán la misma cantidad de calor; pero la superficie blanca remitirá mucho del calor absorbido, mientras que la brillante no, por lo que alcanzará una temperatura mucho más alta.

La superficie blanca teórica tiene el máximo valor del coeficiente de reflexión, $r=1$ y la mínima absorción, $a=0$. Por otro lado, la superficie negra teórica tiene el mínimo valor de reflexión, $r=0$ y la máxima absorción, $a=1$. Por tanto, podemos deducir que la absorptividad de un material es recíproco a su reflectividad.

Las propiedades de emisividad, absorptividad, reflectividad y transmisividad son fundamentales para entender el fenómeno de la radiación térmica y el funcionamiento del algoritmo de estudio.

MATERIAL DE SUPERFICIE	REFLECTIVIDAD
Plata brillante	93
Aluminio brillante	85
Cal	80
Cobre brillante	75
Plancha de cromo	72
Pintura croma blanca	71
Mármol blanco	54
Pintura verde clara	50
Pintura de aluminio	45
Piedra caliza	43
Madera clara	40
Asbesto cemento	29
Ladrillo arcilla roja	23-30
Pintura gris	25
Hierro galvanizado oxidado	10
Negro mate	3

Tabla 2.2. Reflectividad de superficies de diferentes materiales constructivos [12]

MATERIAL DE SUPERFICIE	ABSORTANCIA
Aluminio altamente pulido	0.15
Cobre altamente pulido	0.18
Cobre mate	0.65
Corcho	0.45
Fundición	0.94
Acero inoxidable, pulido	0.37
Mármol blanco	0.46
Asfalto	0.90
Ladrillo rojo	0.75
Ladrillo rojo claro	0.55
Grava	0.29
Laca negra lisa	0.96
Pinturas blancas	0.12-0.16

Tabla 2.3. Absortividad de superficies de diferentes materiales constructivos [12]

2.8. Convección y radiación en paralelo

Una superficie puede estar afectada al mismo tiempo por fenómenos de convección y radiación. Para calcular la velocidad de transferencia de calor debido a estos mecanismos se aplica la suma de la velocidad por convección y radiación, dando lugar a la siguiente expresión:

$$q = q_c + q_r$$

$$q = h_c A (T_1 - T_2) + h_r A (T_1 - T_2)$$

$$q = (h_c + h_r) A (T_1 - T_2)$$

Si expresamos la velocidad en función de las resistencias situadas en paralelo, la ecuación resultante es:

$$q = (T_1 - T_2) / R_c + (T_1 - T_2) R_r$$

3. ESTUDIO COMPARATIVO DE CUBIERTAS

3.1. Contexto y localización

Para el presente estudio se ha decidido seleccionar dos zonas subtropicales, las cuales comparten propiedades climatológicas muy similares. Se escoge un punto aleatorio de Canarias, con la excepción de no estar situado en la zona litoral (la temperatura dada en la cara exterior de la superficie se vería reducida considerablemente gracias a los vientos alisios), y otro punto tomado al azar dentro del Sahara con un previsible valor alto de radiación. La región se denomina Tata, localizada dentro de Marruecos, con otro requisito indispensable de que no se produzcan sombras debido al relieve o edificaciones colindantes.

El punto de estudio en Canarias se sitúa en el municipio de San Bartolomé, localizado geográficamente en la latitud $27^{\circ} 48' 48''\text{N}$ y longitud $15^{\circ} 34' 28''\text{O}$. Altura 390 metros sobre el nivel del mar.

El punto de estudio en Tata (Marruecos) está localizado geográficamente en la latitud $23^{\circ} 39' 16''\text{N}$ y longitud $7^{\circ} 58' 14''\text{O}$. Altura 450 metros sobre el nivel del mar.

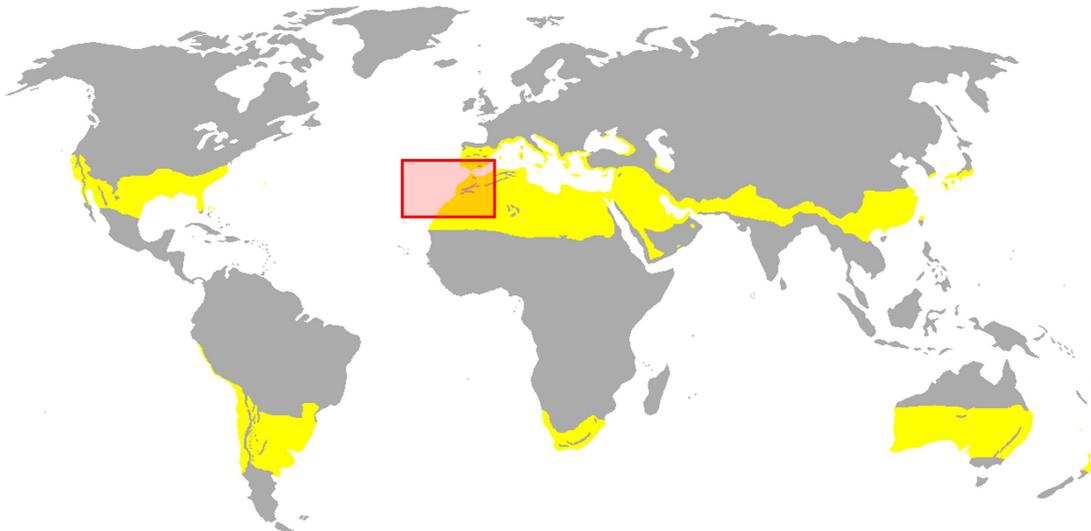


Figura 3.1: Mapa de regiones subtropicales

3.2. Toma de valores de radiación para el día más desfavorable en Canarias

Los valores tomados para estimar la radiación global, entendiendo ésta como la suma de las irradiancias directa y difusa sobre plano horizontal, deberían ser estudiados durante el día más desfavorable, coincidiendo este con el solsticio de verano. En las regiones subtropicales más próximas al Ecuador, el Sol se encuentra muy cerca de la vertical en los meses de verano, concretamente el 21 de Junio.

El recorrido solar del 21 de Junio se caracteriza porque al mediodía (12:00 hora solar), cuando el sol se haya sobre el Sur, se forma con el Cenit un ángulo igual a la Latitud j menos la declinación ($d = +23,5^\circ$), de manera que se puede calcular la altura solar como $A = 90 - j + 23,5^\circ$. En el caso de Canarias, cuya latitud es de 28° N, el 21 de Junio al mediodía la altura del sol será $A = 90 - 28 + 23,5 = 85,5^\circ$, casi en el cenit. Por tanto, podemos asegurar que estamos ante el día en el que la radiación es la mayor de todo el año a cielo limpio.

La estimación de valores se lleva a cabo según PVGIS, con una latitud concreta para un punto de Gran Canaria (latitud $27^\circ 45' 20''$ N y longitud $15^\circ 36' 22''$ O), por lo que podemos simplificar los valores usando 28° N.

La latitud establece la relación entre el lugar y el sol. Influye directamente en la radiación solar tanto directa como difusa y, por lo tanto, en las condiciones más generales del clima. En particular señala la posición del sol con respecto al punto de estudio a lo largo del tiempo y establece los ciclos anuales con las estaciones y los ciclos diarios con la variación día-noche.

3.3. Radiación y temperatura interior ambiente ideal. Carta bioclimática de Olygay

La Carta Bioclimática de Olygay es un diagrama en el que en el eje de abscisas se representa la humedad relativa y en el de ordenadas la temperatura como condiciones básicas que afectan a la temperatura sensible del cuerpo humano. Dentro de él se señala la zona que contiene los sistemas de valores temperatura-humedad en las que el cuerpo humano requiere el mínimo gasto de energía para ajustarse a la llamada zona de confort.

La zona de confort señalada en el diagrama es aquella en la que, a la sombra, con ropa ligera y con baja actividad muscular, se tiene una sensación térmica agradable.

La carta que se presenta esta adaptada a las condiciones de Canarias, válida para regiones con una latitud de 28° y una altitud media de 300 m (válida para nuestro caso de estudio).

Los puntos temperatura-humedad que están por debajo de la zona de confort (momentos infracaletados), pueden ser restituidos al confort por medio de la radiación, como puede ser la radiación solar directa.

El límite inferior de la zona de confort, 21,5°C, establece una separación por encima de la cual es necesaria la utilización de la protección solar y por debajo de la cual se necesita radiación. A partir de este límite y hacia arriba la zona de bienestar asciende con el movimiento del aire y desciende por radiación solar.

El límite superior de la zona de confort, se ha fijado en 28°C con humedades relativas medias de hasta un 50%, disminuyendo gradualmente cuando la humedad aumenta.

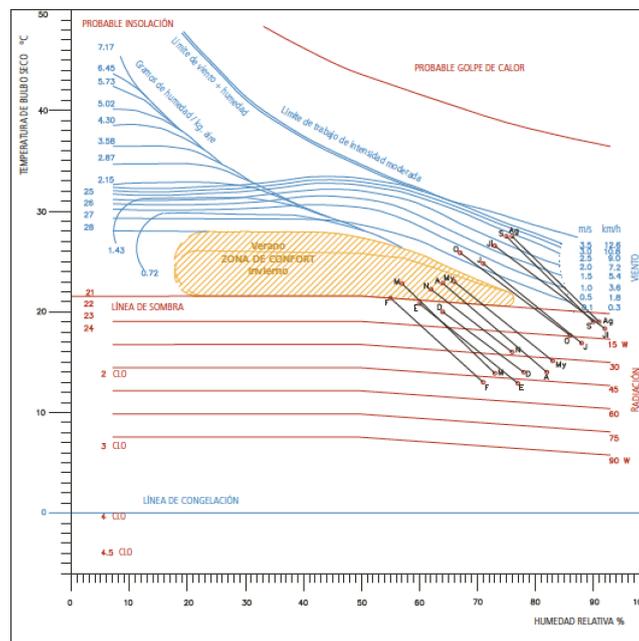


Figura 3.3: Carta Bioclimática de Olygay. Maspalomas. [8]

Los puntos del diagrama que están por encima de la zona de confort, corresponden a las condiciones climáticas en las que hay un exceso de calor (momentos sobrecalentados).

Por lo tanto, trataremos de buscar valores de temperatura ambiente interior situados en la franja de **21,5° C a 28° C**.

3.4. Tipos de cubierta y materiales empleados

El trabajo recoge diferentes soluciones que son utilizadas con frecuencia en la arquitectura, como pueden ser las cubiertas transitables caliente y fría, y algunas soluciones menos recurrentes como las cubiertas ventiladas. Dentro de este segundo grupo se profundiza en la búsqueda de nuevos diseños que puedan favorecer la ventilación de la cámara con el fin de disminuir la temperatura interior de la misma. En ambos grupos se integran dos variables importantes que condicionan el resultado de la simulación: el uso del color (albedo) y el material empleado.

CASO 1

CUBIERTA TRADICIONAL TRANSITABLE “SIN AT E IMPERMEABILIZANTE”			
Materiales	Densidad (kg/m ³)	Conductividad (W/mK)	Cap. Calorífica (J/kg·K)
1. Forjado unidireccional de semiviguetas y bovedillas	1110	R=0,32	800
2. Mortero de áridos ligeros (perlita)	1000	0,41	1000
3. Baldosa cerámica	2000	1,00	800

(1) Forjado unidireccional con un canto de 300 mm y un peso de 333 kg/m², incluyendo capa de compresión y viguetas de hormigón.

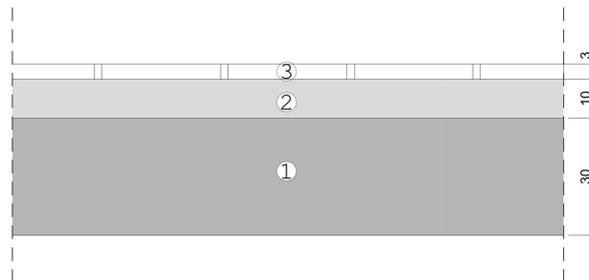


Figura 3.2: Detalle de cubierta tradicional transitable sin AT e impermeabilizante

El primer caso de estudio se lleva a cabo con lo mínimo necesario para construir una cubierta, sin tener en cuenta el aislamiento térmico y el impermeabilizante. Con esta solución se busca obtener resultados con espesores que varían de 15 a 30 cm, con el fin de comprobar el espesor óptimo y la respuesta de la inercia térmica de los materiales. El acabado se realiza en terrado de color rojo con una absorción del 75%, aunque para demostrar la importancia de la reflectividad se variará el porcentaje imprimiendo diferentes colores en la superficie.

CASO 2

CUBIERTA PLANA TRANSITABLE NO VENTILADA CON AISLAMIENTO TÉRMICO			
Materiales	Densidad (kg*m)	Conductividad (m ²)	Cap. Calorífica (J/kg*K)
1. Forjado unidireccional de semiviguetas y bovedillas	1110	R=0,32	800
2. Aislamiento térmico	-	0,039	800
3. Mortero de áridos ligeros (perlita)	1000	0,41	1000
4. Baldosa cerámica	2000	1,00	800

- (1) Forjado unidireccional con un canto de 300 mm y un peso de 333 kg/m², incluyendo capa de compresión y viguetas de hormigón.
- (2) Lana de roca ISOVER, revestido en una de sus caras con un complejo de oxiasfalto y un film de polietileno termofusible.

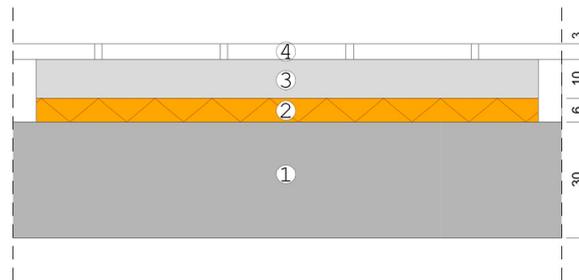


Figura 3.3: Detalle de cubierta plana transitable no ventilada con AT

Para este segundo caso de estudio se incorpora una capa fundamental en la cubierta que contribuye al ahorro energético, es decir, el aislante térmico. El aislante térmico es una pieza clave para mejorar las condiciones pasivas del edificio, por lo que se buscarán soluciones variando el espesor del AT, hasta encontrar el espesor óptimo que nos aporte una relación eficiente entre la cantidad de material invertido y las pérdidas de energía.

CASO 3

CUBIERTA VENTILADA TRANSITABLE			
Materiales	Densidad (kg*m)	Conductividad (m)	Cap. Calorífica (J/kg*K)
1. Forjado unidireccional de semiviguetas y bovedillas	1110	R=0,32	800
2. Aislamiento térmico	-	0,039	800
3. Cámara de aire	1,217	0,026	1005
4. Baldosa cerámica	2000	1,00	800

- (1) Forjado unidireccional con un canto de 300 mm y un peso de 333 kg/m², incluyendo capa de compresión y viguetas de hormigón.
- (2) Lana de roca ISOVER, revestido en una de sus caras con un complejo de oxiasfalto y un film de polietileno termofusible.

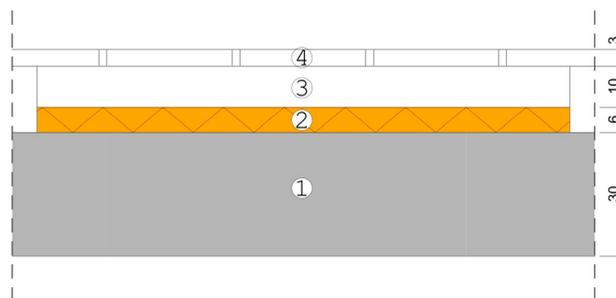


Figura 3.4: Detalle de cubierta plana transitada ventilada con AT

Para el tercer caso de estudio se investiga una cubierta más compleja que mejorará de antemano la temperatura interior del edificio. Esto es, la cubierta ventilada, en la cual se prevé una cámara de aire que aisle gracias a su baja conductividad. La investigación está enfocada hacia el conocimiento del espesor óptimo de la cámara de aire, para tener la certeza de cuando estamos sobredimensionando dicha cámara y cuando el espesor es muy pequeño para disminuir la temperatura del exterior al interior.

CASO 4

CUBIERTA VENTILADA MEDIANTE JUNTAS DEL PAVIMENTO			
Materiales	Densidad (kg*m)	Conductividad (m)	Cap. Calorífica (J/kg*K)
1. Forjado unidireccional de semiviguetas y bovedillas	1110	R=0,32	800
2. Cámara de aire	1,217	0,026	1005
3. Baldosa poliestireno expandido (EPS)	15	0,037	100

(1) Forjado unidireccional con un canto de 300 mm y un peso de 333 kg/m², incluyendo capa de compresión y viguetas de hormigón.

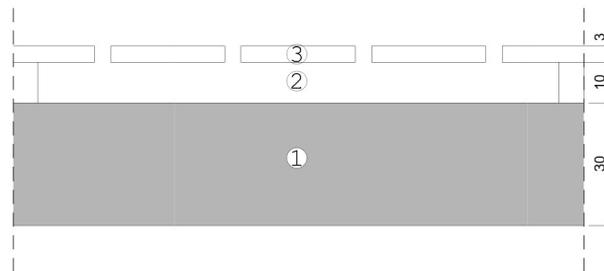


Figura 3.8: Detalle de cubierta ventilada mediante juntas de pavimento

El cuarto caso es una solución experimental a través de una cubierta que se autoventila por medio de las juntas del pavimento. La idea consiste en crear una circulación de aire entre el pavimento y las juntas del mismo, desplazando cada pieza de 2 a 3 cm de modo que exista ventilación y que la junta no sea demasiado ancha para que no pierda funcionalidad. Se plantea una ventilación entre las juntas del pavimento y otra vía de investigación en la que la propia pieza se autoventile por la geometría que la define.

CASO 5

CUBIERTA VENTILADA CON LOSA FILTRON			
Materiales	Densidad (kg*m)	Conductividad (m)	Cap. Calorífica (J/kg*K)
1. Forjado unidireccional de semiviguetas y bovedillas	1110	R=0,32	800
2. Mortero de áridos ligeros (perlita)	1000	0,41	1000
3. Aislamiento térmico	-	0,039	800
4. Cámara de aire	1,217	0,026	1005
5. Losa FILTRON	32	0,029	100

- (1) Forjado unidireccional con un canto de 300 mm y un peso de 333 kg/m², incluyendo capa de compresión y viguetas de hormigón.
- (2) Lana de roca ISOVER, revestido en una de sus caras con un complejo de oxiasfalto y un film de polietileno termofusible.
- (3) Pavimento aislante y drenante compuesto por una base de poliestireno extruído (XPS) y una capa de hormigón poroso de altas prestaciones (HPAP).

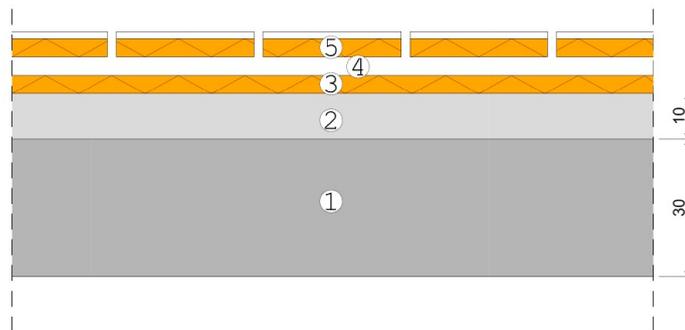


Figura 3.9: Detalle de cubierta ventilada mediante losa FILTRON

El quinto y último caso es una solución más desarrollada que la anterior, ya que además de la cámara ventilada se coloca un doble aislamiento térmico que provoca una ventilación natural manteniendo el interior lo más hermético posible. La segunda capa de aislamiento realizada con losa tipo FILTRON se sostiene mediante plots, y es capaz de ventilar a través de la cámara ventilada y la separación que existe entre las juntas de cada pieza.

4. MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA CUBIERTA

4.1. Modelo físico y matemático

La modelización del comportamiento térmico de la cubierta consiste en definir un sistema de ecuaciones algebraicas que permita conocer la temperatura superficial del material incorporando el factor de la radiación en función del tiempo.

Para el desarrollo del modelo se han tenido en cuenta las siguientes hipótesis de partida:

- Transferencia unidimensional, ya que solo consideramos la transferencia de calor a lo largo del espesor de la cubierta (eje z).
- Régimen estacionario (R, T, constantes en el instante de mayor radiación diaria)
- Variables termofísicas constantes (Cp, k = cte)
- No existe fuente interna que genere calor
- Conservación de la energía dentro del sistema

La formulación matemática en problemas de transmisión de calor en el interior de los materiales se rige por la ecuación diferencial que surge de sustituir la expresión del flujo de calor (campo vectorial) en la ecuación de conservación de la energía. Por definición de flujo $\sigma = -k \text{ grad } T$, es el flujo que se produce por la variación de T,

$$\text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad (4.1.1)$$

siendo T la temperatura, el flujo de calor al transmitirse el calor en el interior de los materiales por proceso de conducción de calor, siendo K la conductividad térmica del material. En realidad, la definición de flujo de calor corresponde también a la ecuación general denominada ecuación constitutiva, la cual nos dice que “cualquier variación de una variable de estado T produce un flujo proporcional al gradiente de dicha variable T, siendo la función de proporcionalidad característica del medio”. En nuestro caso esta función es K, la conductividad térmica del material [W/m K], siendo la variable de estado (variable incógnita en nuestro trabajo) la temperatura.

En general $K = K(x, y, z, T)$, se puede aproximar por una constante en ciertos materiales y determinados rangos de temperatura.

Por otro lado, tenemos la ley de conservación de la energía que nos dice que la divergencia del flujo es igual a las fuentes de calor en el interior del material, por tanto,

$$\text{div} (-K \text{ grad } T) = q$$

En materiales anisótropos (caso general) la función de proporcionalidad K puede ser diferente en las distintas direcciones del flujo, aunque para muchos materiales y aplicaciones podemos considerar que los materiales son isótropos, es decir, conducen el calor en igual intensidad en cada dirección:

$$\vec{\sigma} = \vec{\sigma}_x + \vec{\sigma}_y + \vec{\sigma}_z = -K_x \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} - K_y \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} - K_z \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad (4.1.2)$$

entonces,

$$\text{div} \left(-K_x \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} - K_y \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} - K_z \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \right) = f \quad (4.1.3)$$

, y por definición de la divergencia queda expresada en una ecuación diferencial en derivadas parciales:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = f(x, y, z) \quad (4.1.4)$$

Considerando las conductividades valores constantes, para el rango de temperaturas de nuestras aplicaciones, tendremos:

$$-\left(K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = f(x, y, z) \quad (4.1.5)$$

Para definir el modelo [3] se considera un tipo de cubierta con un número i de capas paralelas como se refleja en la *fig 1*, la superficie exterior del forjado queda expuesta a radiación solar $E(t)$ y a la temperatura ambiente exterior $T_o(t)$. Se considera la ecuación de transmisión de calor por conducción, siendo k_i la conductividad térmica de cada material i :

$$k_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2} + k_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z_i^2} = 0 \quad (4.1.6)$$

Dicha superficie exterior de la cubierta recibe el flujo de calor de ondas de longitud de onda corta por incidencia de la radiación solar, interviniendo la reflectividad solar de la superficie. Asimismo la cubierta está sometida también a procesos de flujo de calor por convección con el aire exterior, que aumenta con el viento y al flujo de calor por radiación térmica con longitud de onda larga desde la atmósfera (con el cielo):

Dentro del espacio de estudio, la temperatura interior T_{int} se considera constante, tomada directamente del MABICAN para un determinado grado de confort, y se aplica una transferencia de calor por convección entre la cubierta y el interior.

También se ha decidido aplicar una temperatura constante al suelo para delimitar la región de estudio y, se toma un valor standard de 22 °C, si bien hemos considerado dos temperaturas exteriores distintas, 28°C y 35°C en el análisis comparativo de los resultados obtenidos de la temperatura que se alcanza a 1 m sobre el suelo para los distintos diseños de las cubiertas.

Se ha implementado la formulación integral de las ecuaciones anteriores en el software del método de elementos finitos libre denominado FreeFem++ y siguiendo las enseñanzas recibidas, prácticas y ejemplos, de los cursos del master, cursos FEE y EMAE.

Una vez definido el mallado, se realiza la discretización geométrica por elementos finitos triangulares en las distintas regiones consideradas que representa nuestra cubierta de estudio, se implementa el algoritmo en función de las propiedades del forjado, tales como la conductividad térmica k (W/K), la difusividad térmica α y la reflectividad solar γ , así como la transferencia interior y exterior de las condiciones del ambiente. Además, se asumen dos premisas para simplificar la transferencia de calor por conducción. La primera de ellas es que la transferencia de calor solo se produce a través de la perpendicular del forjado [3]. La segunda es tomar todos los puntos del material que compone el forjado como homogéneos, por lo que sus propiedades térmicas son constantes.

La ecuación que gobierna el sistema, es la ecuación de condición de flujo de calor en el contorno superior de la cubierta (material 1):

$$-k_1 \frac{\partial T}{\partial n} = (1 - \gamma)E - h_{ext}(T_1 - T_{ext}) + \sigma\epsilon(T_1^4 - T_{cielo}^4) \quad (4.1.7)$$

La transferencia de calor por convección entre la cubierta y el exterior, se calcula mediante la diferencia de temperatura ($T_1 - T_0$) entre la cara exterior del forjado y el ambiente exterior, expresada mediante:

$$q_{conv} = h_c (T_1 - T_0)$$

donde h_c es el coeficiente de convección (W/m² K) en la cara exterior del forjado, que podemos obtener mediante una correlación propuesta por McAdams [10],

$$h_c \text{ (W/m}^2 \text{ K)} = 5,7 + 3,8 V,$$

donde V es la velocidad del viento. Tomando como dato la velocidad del viento de un año típico desde la estación localizada en Gando [14], h_c es igual a $81,7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

La transferencia de calor por radiación entre la cubierta y el exterior, se calcula mediante la diferencia de temperatura elevada a la cuarta potencia ($T_1^4 - T_{\text{cielo}}^4$) entre la cara exterior del forjado y el ambiente exterior, expresada mediante:

$$q_{\text{rad}} = \sigma \gamma (T_1^4 - T_{\text{cielo}}^4)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann con un valor de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, γ es la emisividad, y T_{cielo} es la temperatura de cielo definida como la temperatura equivalente de un cuerpo negro que emite globalmente la misma radiación de onda larga que la atmósfera sobre una superficie horizontal.

Para la transferencia de calor por radiación de la cubierta a la atmósfera, la correlación empírica para la temperatura de cielo sugerida por Swinbank,

$$T_{\text{cielo}} = 0,0552 T_0^{1,5} \text{ (K)}$$

Aplicando la metodología del método de elementos finitos se obtiene la denominada formulación variacional, multiplicando por la función test v , integrando y aplicando teoremas de cálculo integral, así para cada región de cálculo Ω :

$$-\int_{\Omega} v \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] d\Omega = \int_{\Omega} v \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} + k \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial z} \right] d\Omega - \int_{\partial\Omega} v k \frac{\partial T}{\partial n} ds = 0$$

en la última integral sustituimos para el contorno superior de la cubierta la expresión anterior, así dicha superficie se resuelve con la ecuación 4.1.7.

En las demás superficies la integral de contorno es nula, por considerar simetría o bien temperatura impuesta. En el primer caso la derivada respecto a la normal es nula y para el segundo caso, el suelo, la metodología del método de elementos finitos corresponde a considerar en la construcción del sistema final de ecuaciones algebraicas a resolver (una vez realizada las aproximaciones polinómicas de la incógnita en cada triángulo de la discretización geométrica) que se anule la función matemática auxiliar v en dicho contorno.

La formulación variacional al ser el problema no lineal (exponente a la cuarta de T) se resuelve linealizándola según método de linealización del punto fijo.

4.2 Cálculo de la influencia del espesor del forjado



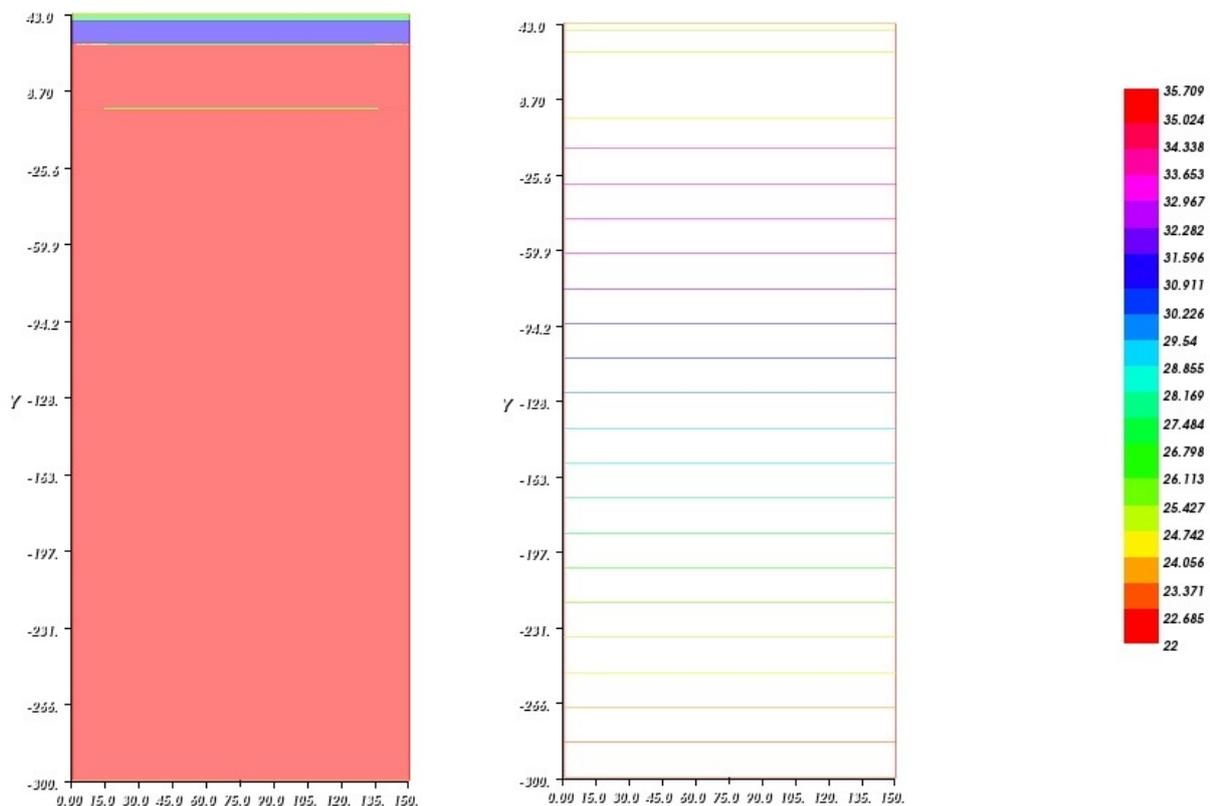
El análisis de esta solución nos permite optimizar el canto del forjado para evitar un gasto de material innecesario. Se estudiará la importancia del espesor a efectos de reducir la temperatura en el interior de los edificios.

$$R = 954 \text{ W/m}^2$$

$$\alpha = 0.75 \text{ (ladrillo rojo cerámico)}$$

$$T_{\text{ext}} = 28 \text{ }^\circ\text{C}$$

-Solución espesor de 30 cm.

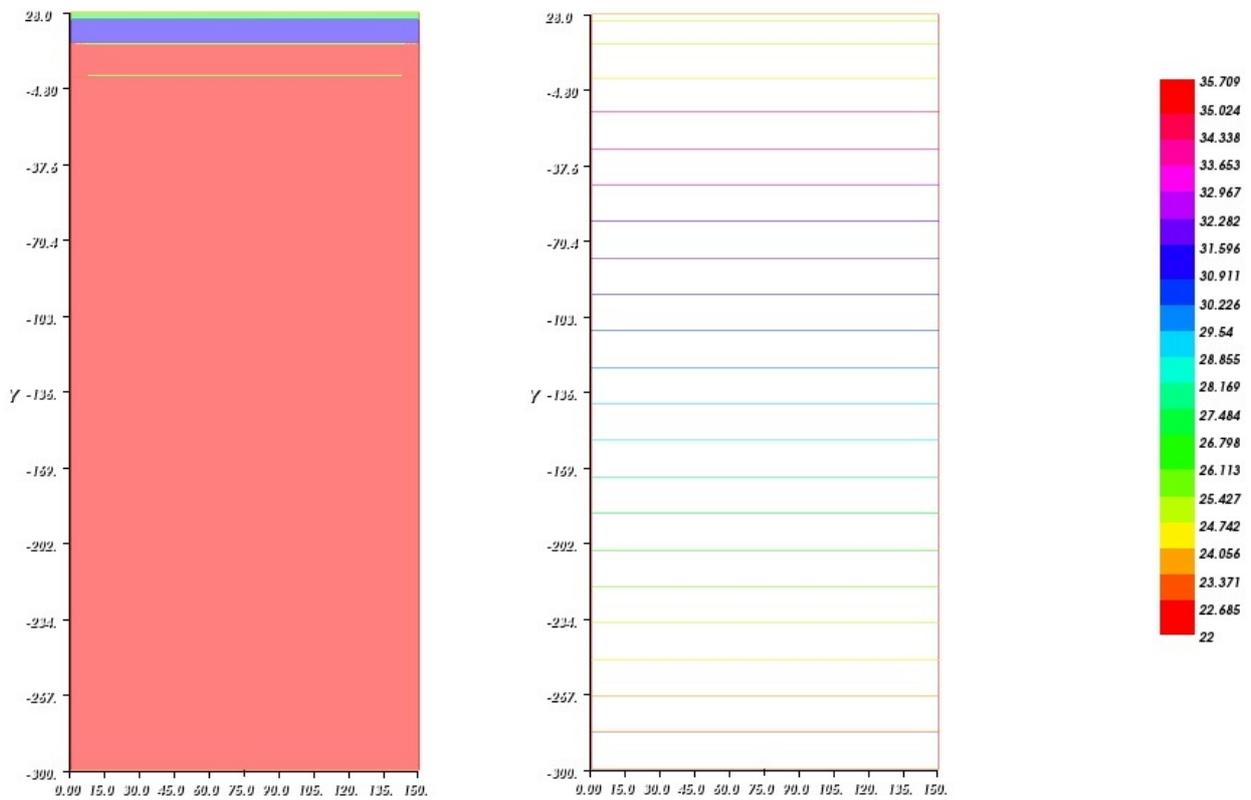


Temperatura en cubierta = **35.70 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **35.62 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **26.54m °C**

-Solución espesor 15 cm



Temperatura en cubierta = **35.70 °C**

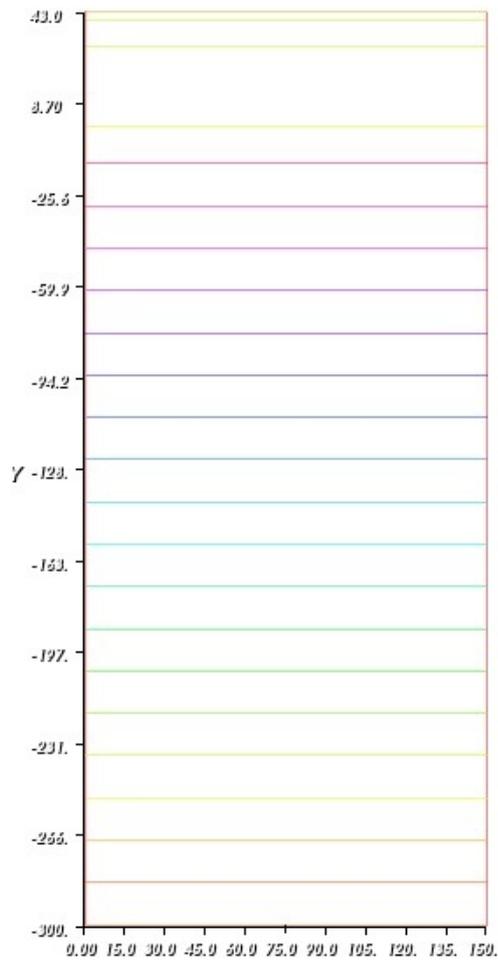
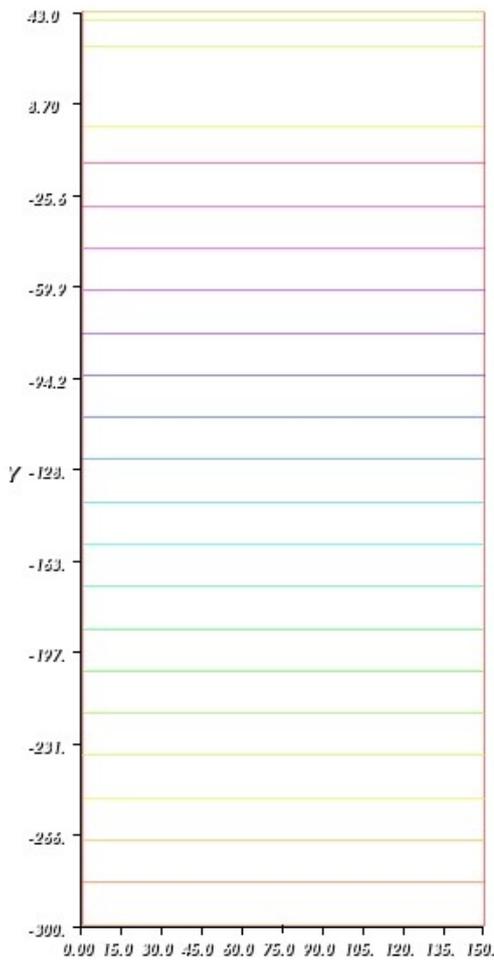
Temperatura en cara interior cubierta = **35.65 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **26.55 °C**

$R = 954 \text{ W/m}^2$

$\alpha = 0.12$ (pinturas blancas)

$T_{\text{ext}} = 28 \text{ }^\circ\text{C}$



-Solución espesor 30 cm

Temperatura en cubierta = **28.65 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **28.61 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **24.20 °C**

-Solución espesor 15 cm

Temperatura en cubierta = **28.65 °C**

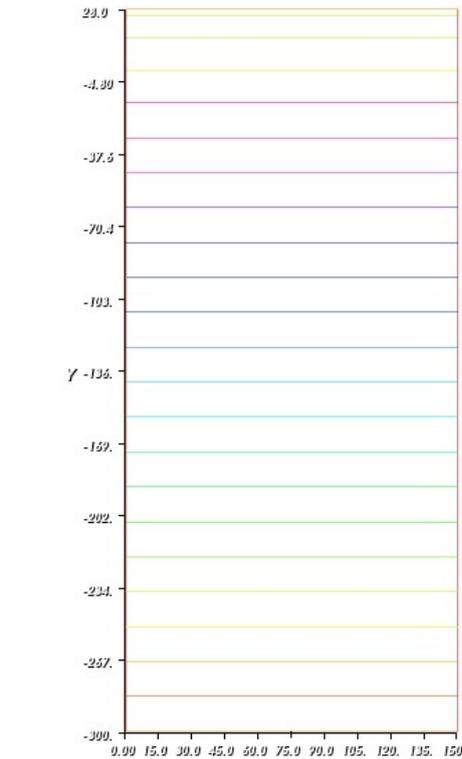
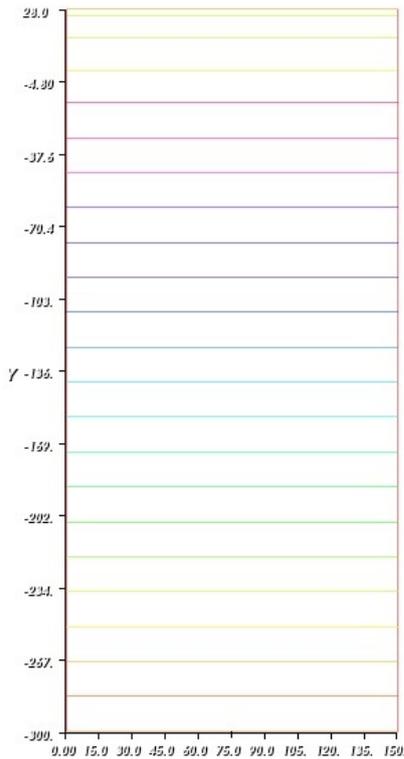
Temperatura en cara interior cubierta = **28.62 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **24.21 °C**

$R = 954 \text{ W/m}^2$

$\alpha = 0.75$ (ladrillo rojo cerámico)

$T_{\text{ext}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$



-Solución espesor 30 cm

Temperatura en cubierta = **42.80 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **42.66 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **28.89 °C**

-Solución espesor 15 cm

Temperatura en cubierta = **42.80 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **42.70 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **28.90 °C**

$R = 954 \text{ W/m}^2$

$\alpha = 0.12$ (pinturas blancas)

$T_{\text{ext}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

-Solución espesor 30 cm

Temperatura en cubierta = **35.77 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **35.68 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **26.56 °C**

-Solución espesor 15 cm

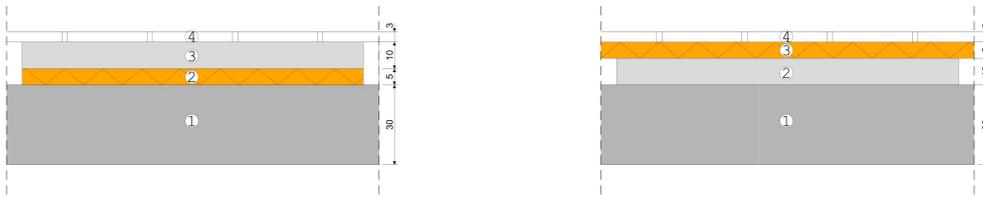
Temperatura en cubierta = **35.77 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **35.71 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **26.57 °C**

Para un mismo valor de radiación, la diferencia de temperatura es mínima si variamos el espesor de la cubierta. La solución más eficiente consiste en aplicar materiales con alta reflectividad, utilizando materiales claros.

4.3. Cálculo con diferentes posiciones del aislamiento térmico



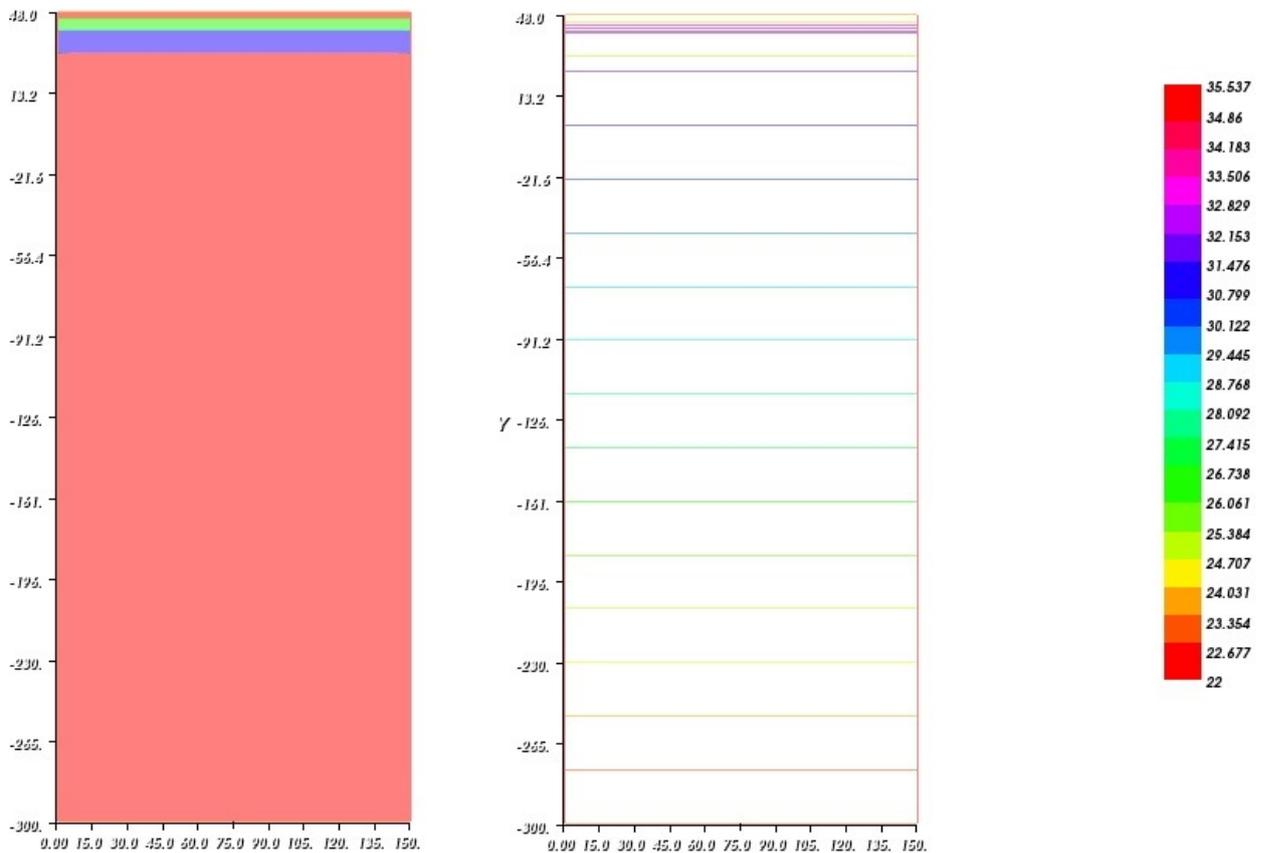
El análisis de esta solución constructiva nos permite conocer la importancia de posicionar el aislamiento térmico correctamente. Se analizarán ambas soluciones para distintos valores de radiación y distintas absorptividades.

$$R = 954 \text{ W/m}^2$$

$$\alpha = 0.75 \text{ (ladrillo rojo cerámico)}$$

$$T_{\text{ext}} = 28 \text{ }^\circ\text{C}$$

-Solución aislamiento térmico debajo

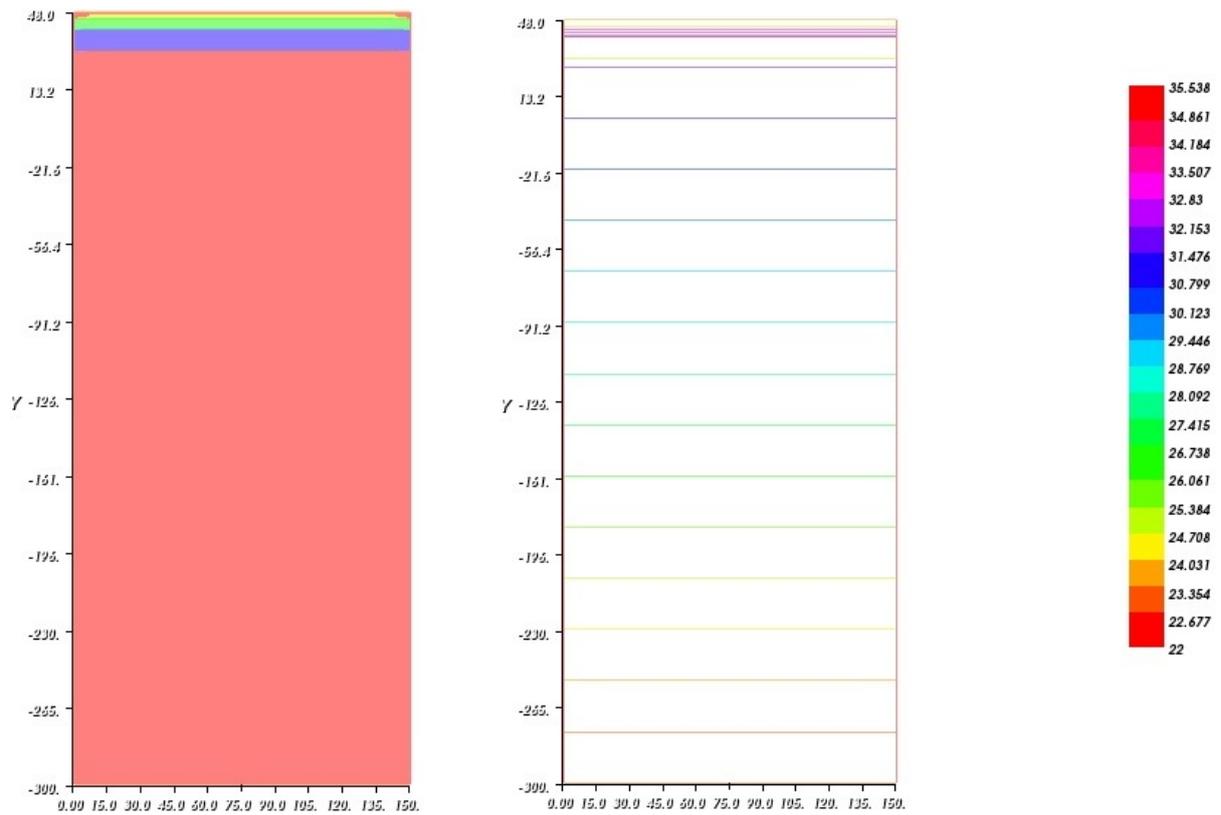


Temperatura en cubierta = **35.54 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **31.25 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **25.08 °C**

-Solución aislamiento térmico encima



Temperatura en cubierta = **35.54 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **31.16 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **25.05 °C**

R = 954 W/m²

α = 0.55 (ladrillo rojo claro cerámico)

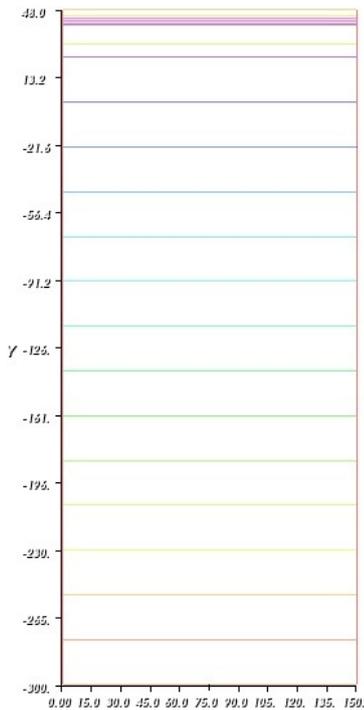
T_{ext} = 28 °C

-Solución aislamiento térmico debajo

Temperatura en cubierta = **33.35 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **29.76 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **24.59 °C**

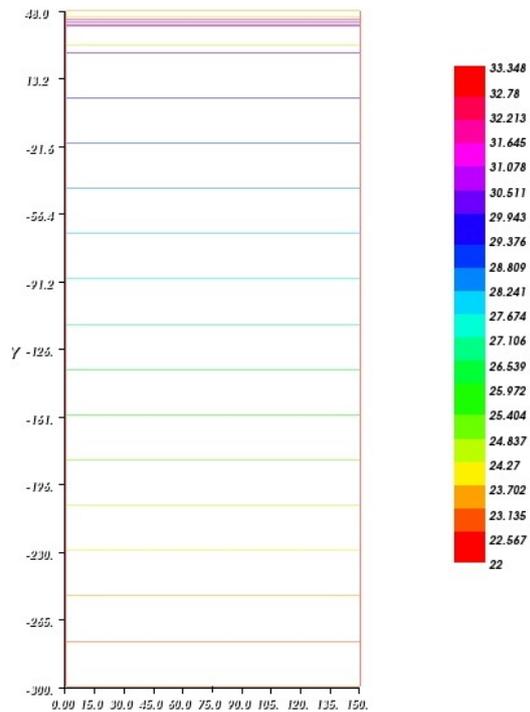


-Solución aislamiento térmico encima

Temperatura en cubierta = **33.35 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **29.69 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **24.56 °C**



R = 954 W/m²

α = 0.12 (pinturas blancas)

T_{ext} = 28 °C

-Solución aislamiento térmico debajo

Temperatura en cubierta = **28.63 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **26.53 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **23.51 °C**

-Solución aislamiento térmico encima

Temperatura en cubierta = **28.63 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **26.49 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **23.50 °C**

R = 954 W/m²

α = 0.75 (ladrillo rojo cerámico)

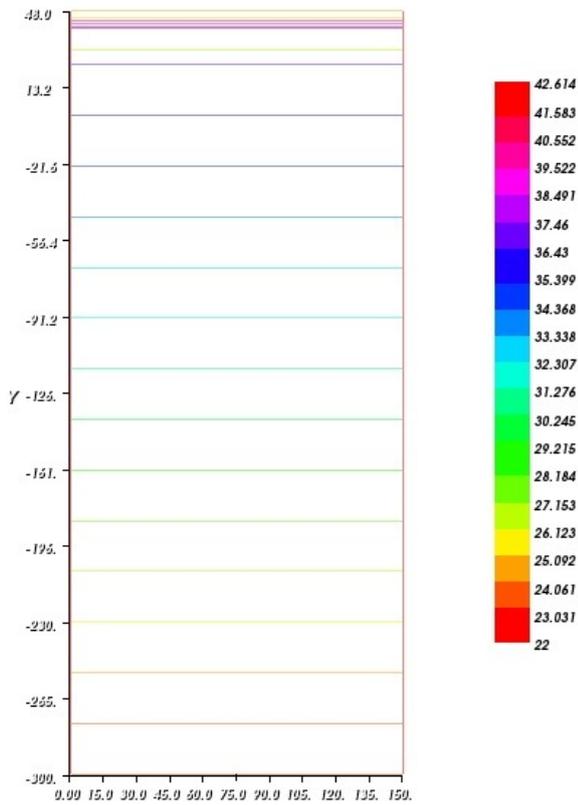
T_{ext} = 35 °C

-Solución aislamiento térmico debajo

Temperatura en cubierta = **42.61 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **36.09 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **26.70 °C**

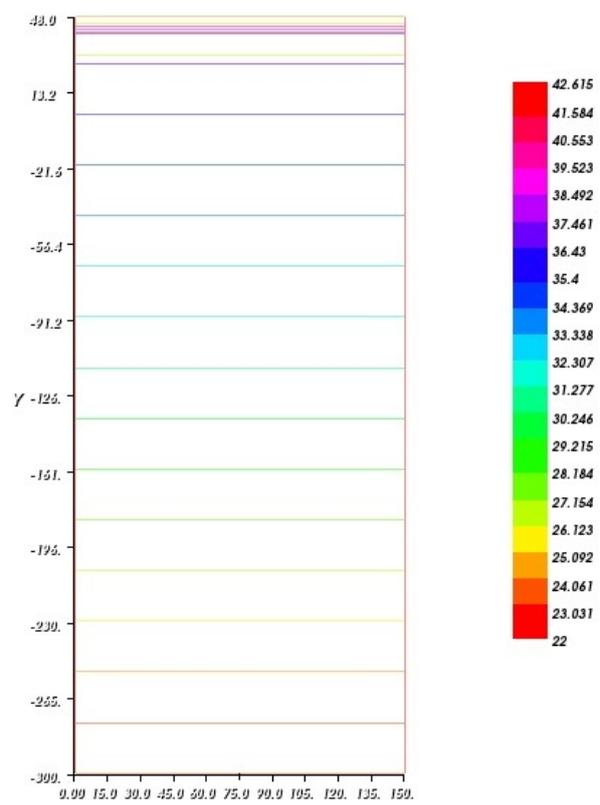


-Solución aislamiento térmico encima

Temperatura en cubierta = **42.61 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **35.95 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **26.65 °C**



R = 954 W/m²

α = 0.55 (ladrillo rojo claro cerámico)

T_{ext} = 35 °C

-Solución aislamiento térmico debajo

Temperatura en cubierta = **40.43 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **34.60 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **26.20 °C**

-Solución aislamiento térmico encima

Temperatura en cubierta = **40.43 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **34.48 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **26.16 °C**

R = 954 W/m²

$\alpha = 0.12$ (pinturas blancas)

T_{ext} = 35 °C

-Solución aislamiento térmico debajo

Temperatura en cubierta = **35.74 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **31.39 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **25.13 °C**

-Solución aislamiento térmico encima

Temperatura en cubierta = **35.73 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **31.30 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **25.10 °C**

Localización: Pamplona

R = 724 W/m²

α = 0.75 (ladrillo rojo cerámico)

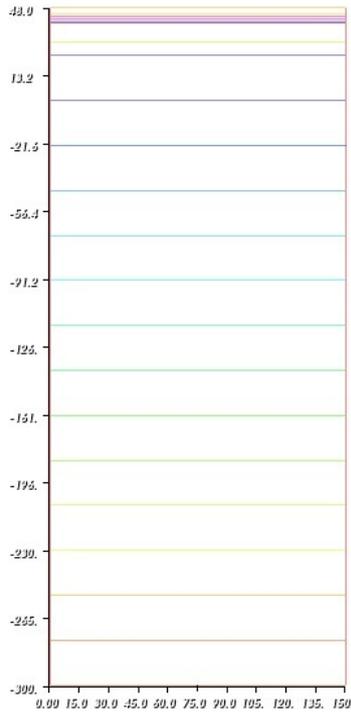
T_{ext} = 35 °C

-Solución aislamiento térmico debajo

Temperatura en cubierta = **40.64 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **34.74 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **26.25 °C**

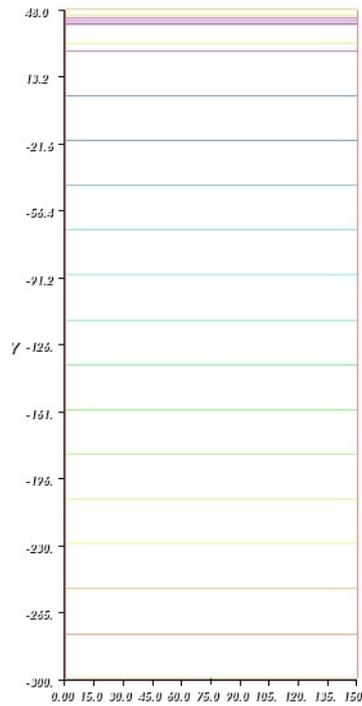


-Solución aislamiento térmico encima

Temperatura en cubierta = **40.64 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **34.62 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **26.20 °C**



R = 724 W/m²

α = 0.55 (ladrillo rojo claro cerámico)

T_{ext} = 35 °C

-Solución aislamiento térmico debajo

Temperatura en cubierta = **38.99 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **33.61 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **25.87 °C**

-Solución aislamiento térmico encima

Temperatura en cubierta = **38.99 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **33.50 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **25.83 °C**

$$R = 724 \text{ W/m}^2$$

$$\alpha = 0.12 \text{ (pinturas blancas)}$$

$$T_{\text{ext}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$$

-Solución aislamiento térmico debajo

Temperatura en cubierta = **35.42 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **31.17 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **25.06 °C**

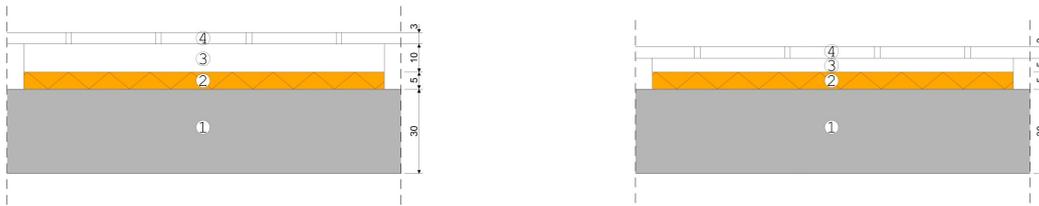
-Solución aislamiento térmico encima

Temperatura en cubierta = **35.42 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **31.08 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **25.03 °C**

4.4. Cálculo con diferentes espesores en la cámara ventilada

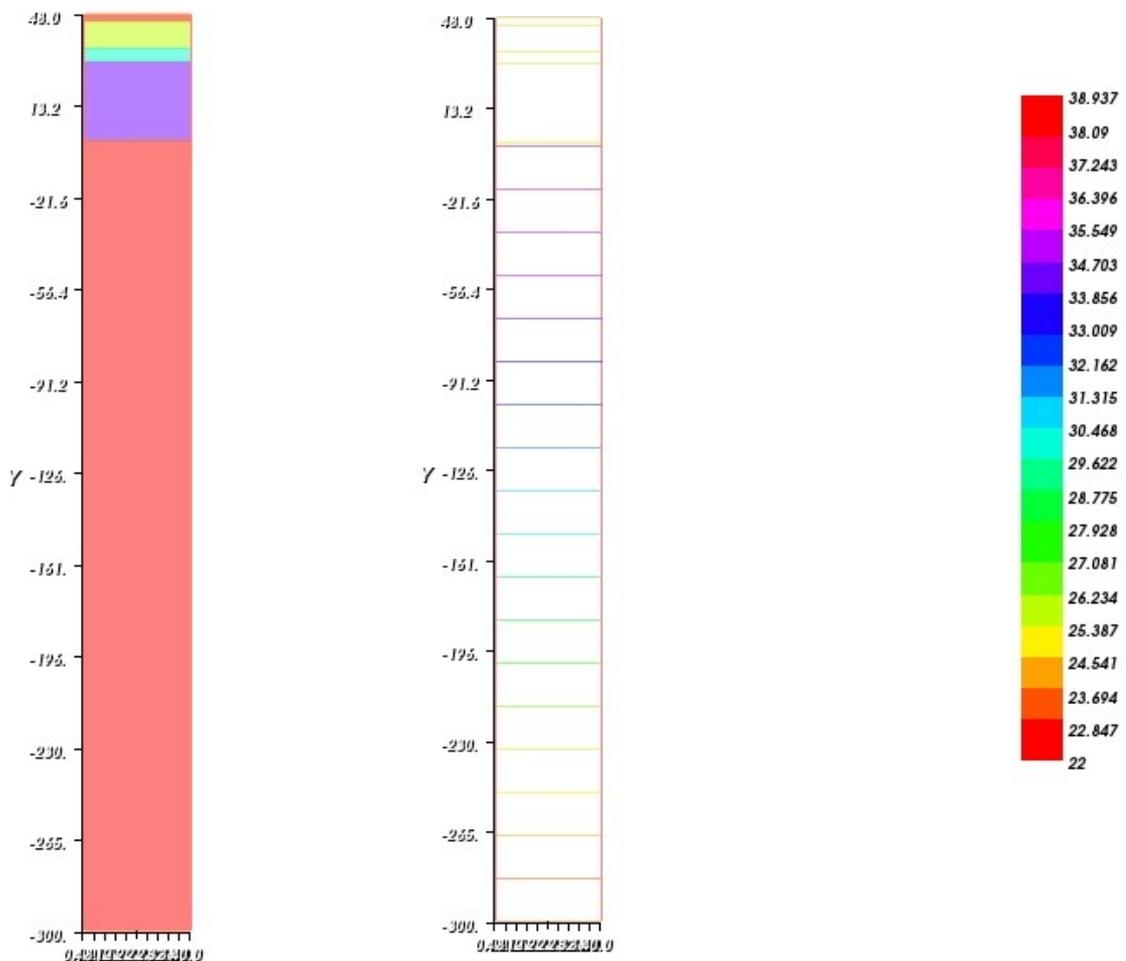


La cubierta ventilada contribuye a reducir la temperatura en el interior del edificio pero es necesario conocer el espesor óptimo de la cámara de aire para que no produzca un efecto contrario al que queremos conseguir. La relación entre el aislante térmico y la cámara de aire permite un mayor ahorro energético, lo que se traduce en un menor costo económico.

Para estudiar este caso se mantiene constante absorptividad, ya que se demuestra en casos anteriores los beneficios que aporta en cada solución. Se analizarán los cambios que se producen al variar los factores de radiación y temperatura para demostrar cual de los dos es el más perjudicial.

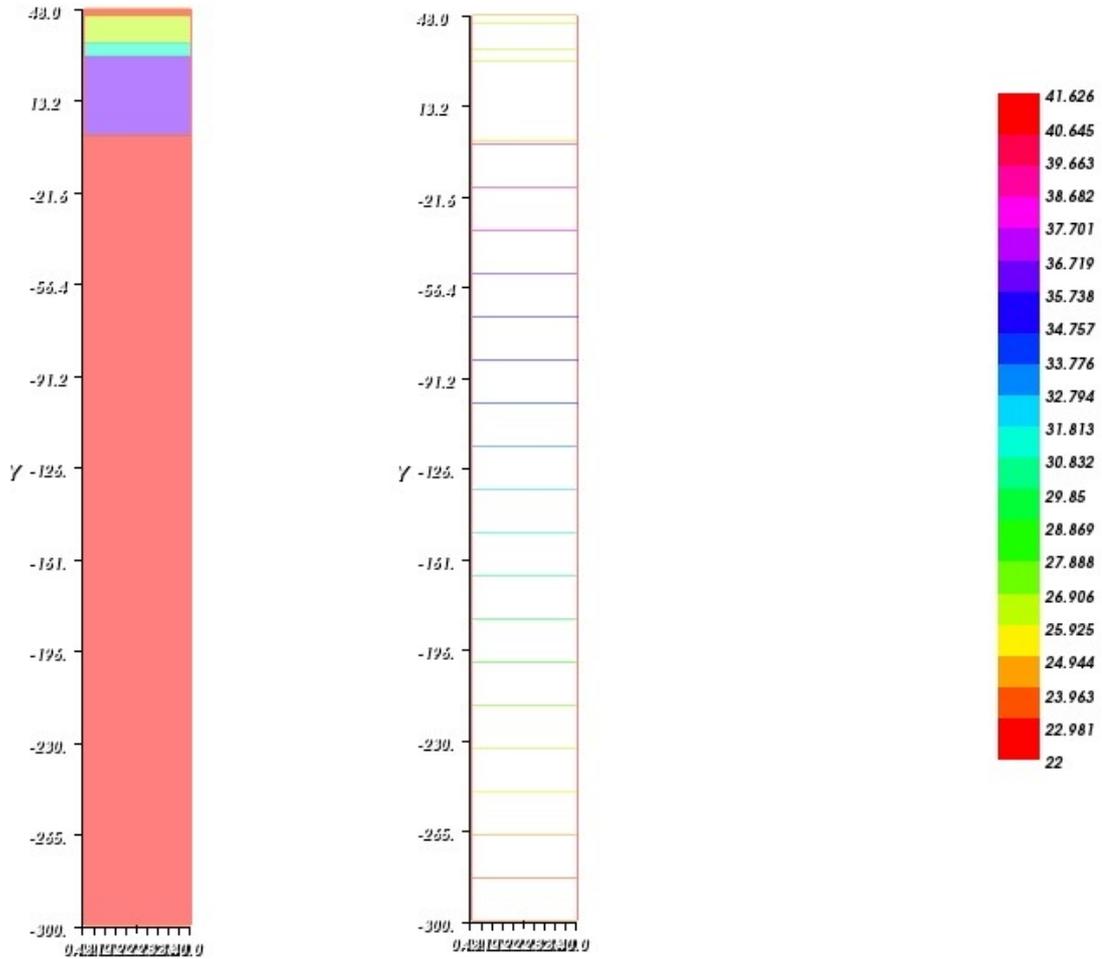
-Solución cámara ventilada de 10 cm.

07:52 $R = 522 \text{ W/m}^2$ $\alpha = 0.75$ (ladrillo rojo cerámico) $T_{\text{ext}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$



Temperatura en cubierta = **38.94 °C**
 Temperatura en cara interior cubierta = **38.14 °C**
 Temperatura a 1m del suelo = **27.37 °C**

09:52 **R = 835 W/m²** **α = 0.75 (ladrillo rojo cerámico)** **T_{ext} = 35 °C**



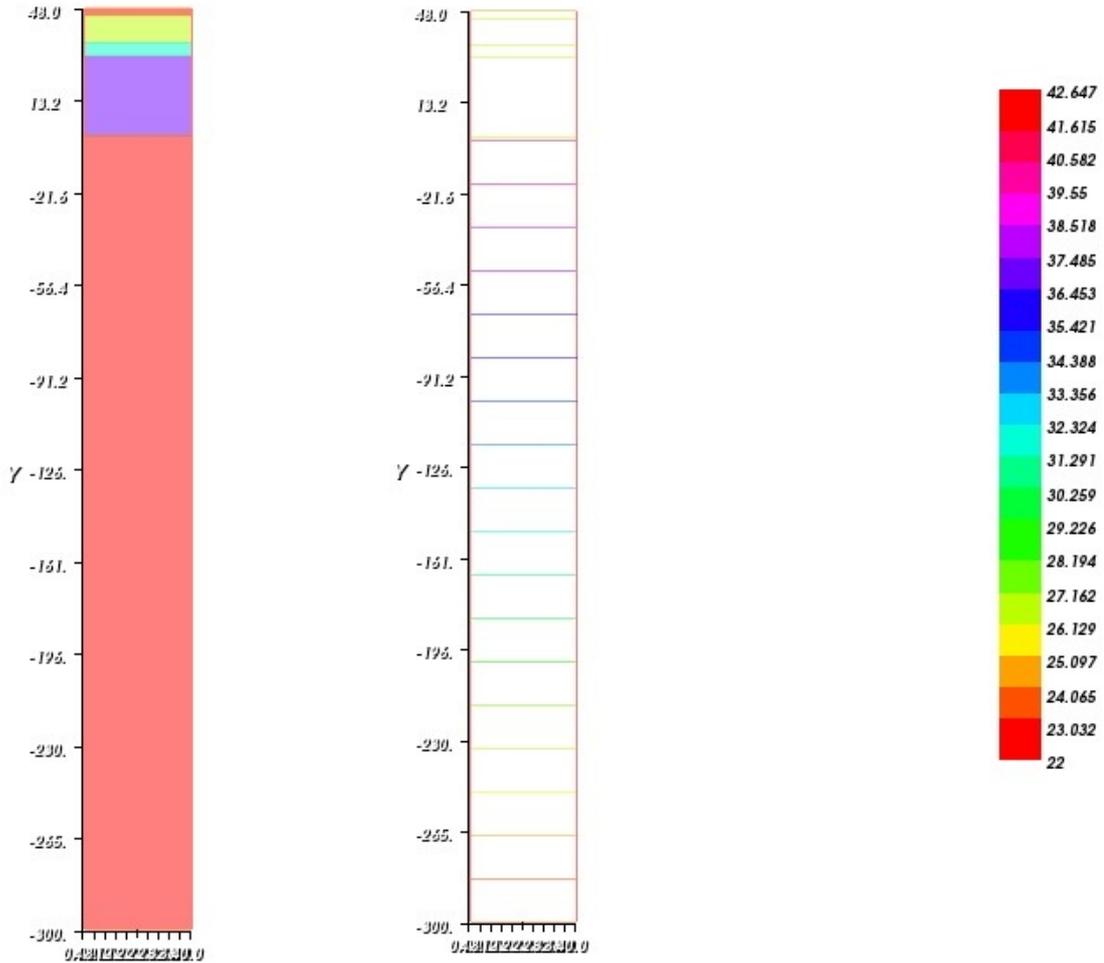
Temperatura en cubierta = **41.62 °C**
 Temperatura en cara interior cubierta = **40.71 °C**
 Temperatura a 1m del suelo = **28.22 °C**

11:52

$R = 954 \text{ W/m}^2$

$\alpha = 0.75$ (ladrillo rojo cerámico)

$T_{\text{ext}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$



Temperatura en cubierta = **42.65 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **41.68 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **28.56 °C**

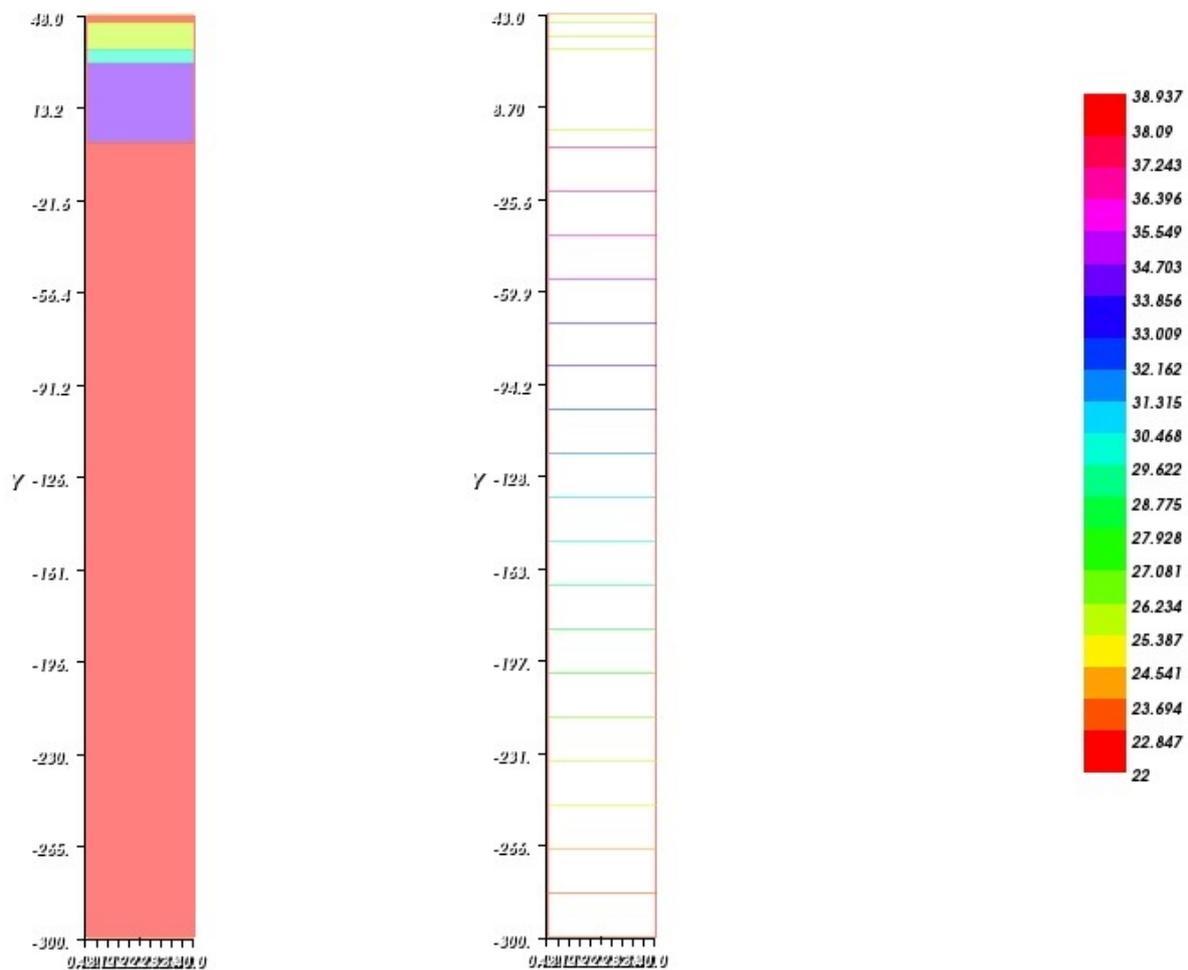
-Solución cámara ventilada de 5 cm.

07:52

$R = 522 \text{ W/m}^2$

$\alpha = 0.75$ (ladrillo rojo cerámico)

$T_{\text{ext}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$



Temperatura en cubierta = **38.94 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **38.41 °C**

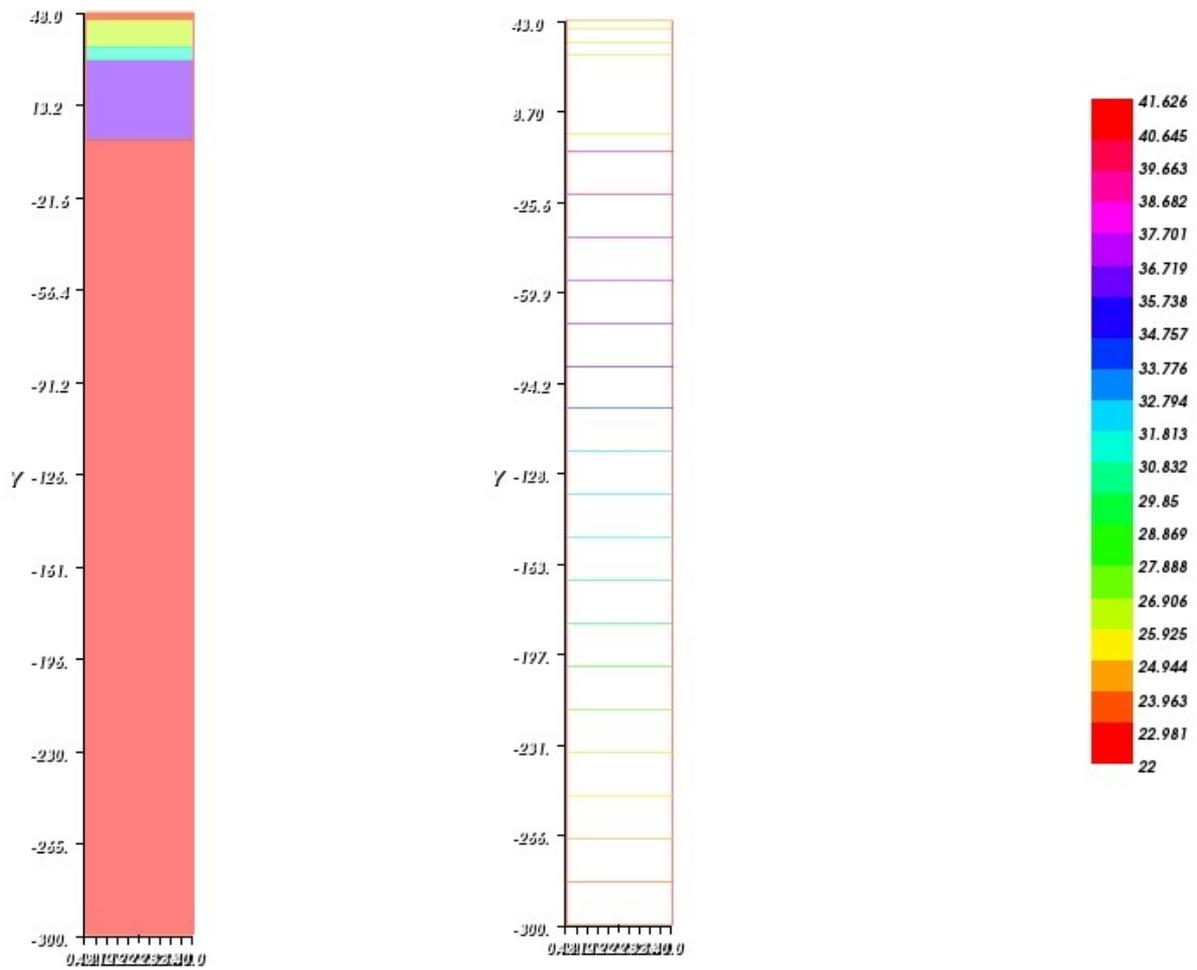
Temperatura a 1m del suelo = **27.46 °C**

09:52

$R = 835 \text{ W/m}^2$

$\alpha = 0.75$ (ladrillo rojo cerámico)

$T_{\text{ext}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$



Temperatura en cubierta = **41.63 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **41.01 °C**

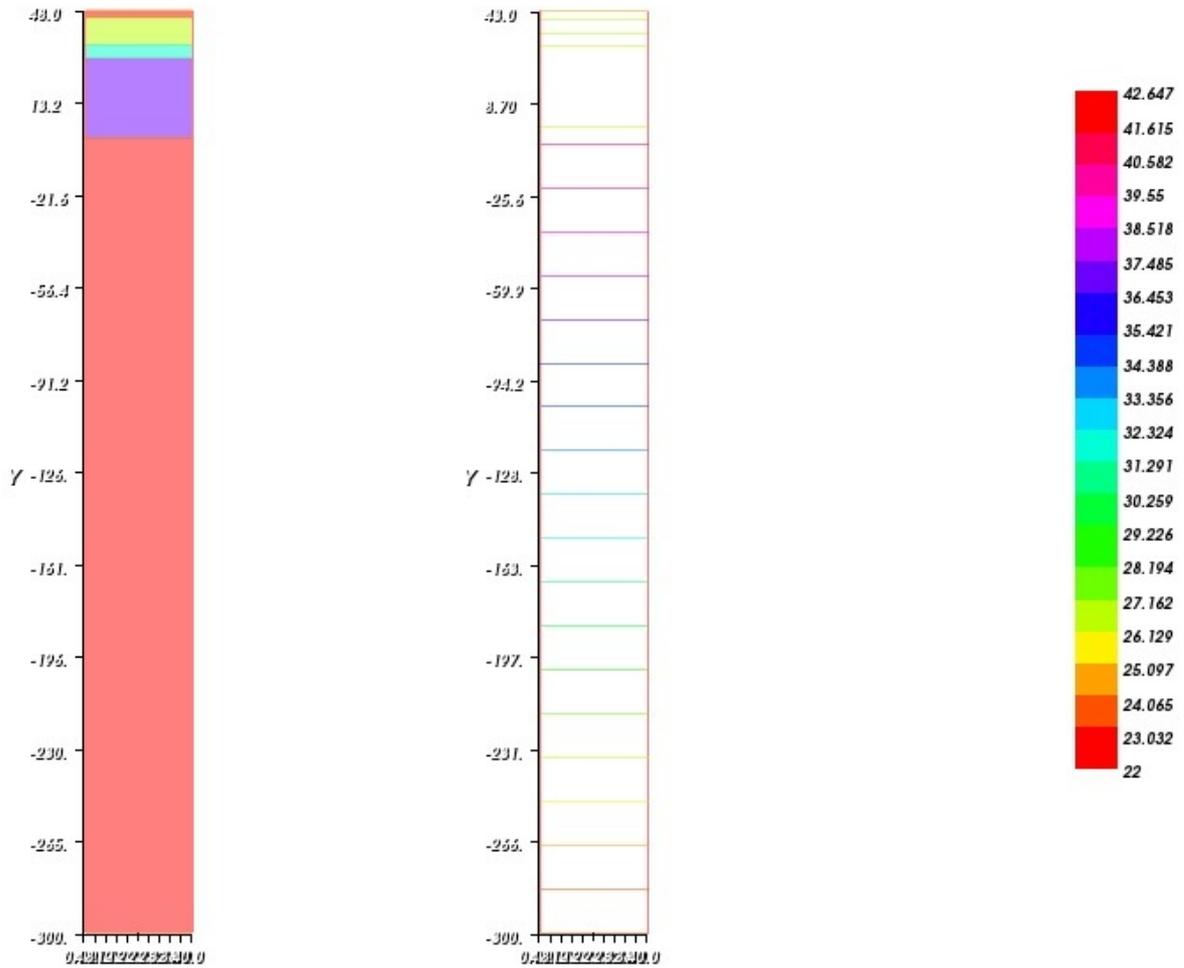
Temperatura a 1m del suelo = **28.32 °C**

11:52

$R = 954 \text{ W/m}^2$

$\alpha = 0.75$ (ladrillo rojo cerámico)

$T_{\text{ext}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$



Temperatura en cubierta = **42.65 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **42.00 °C**

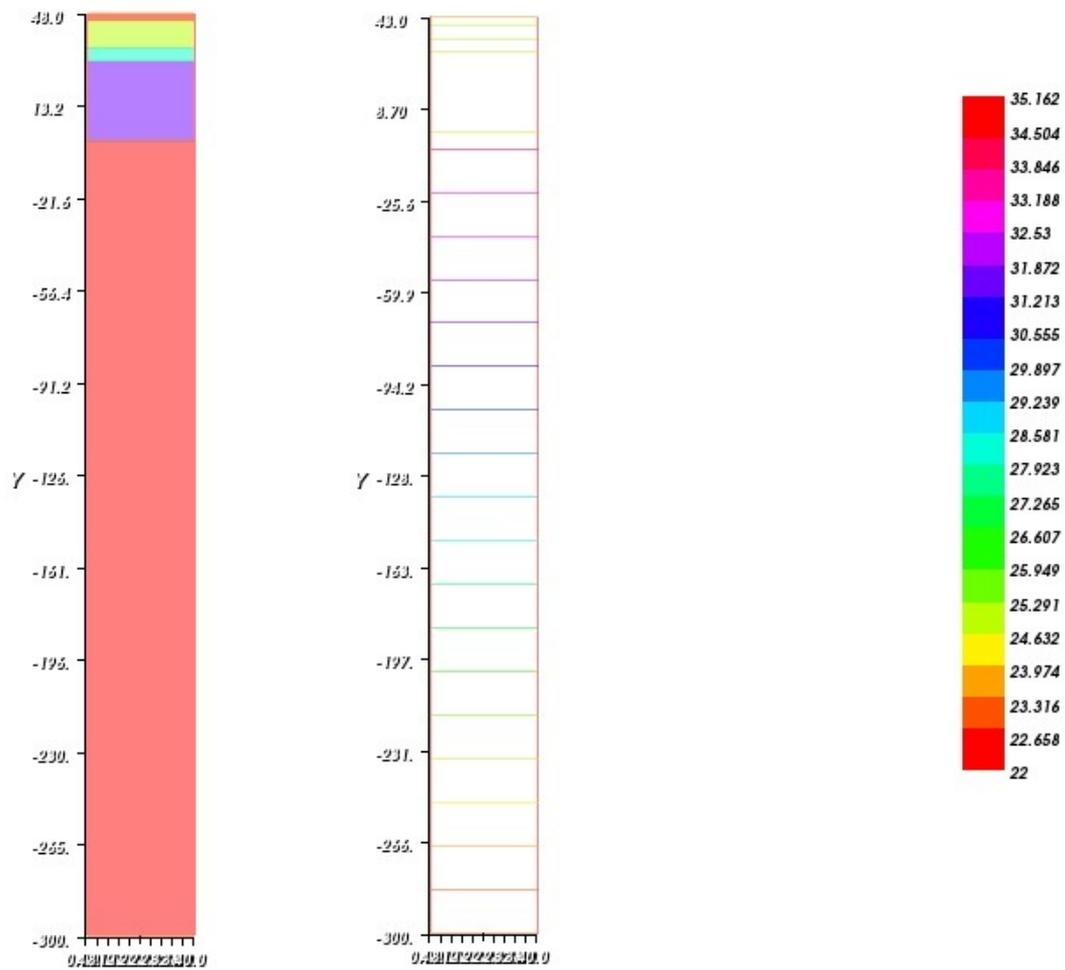
Temperatura a 1m del suelo = **28.66 °C**

07:52

$R = 522 \text{ W/m}^2$

$\alpha = 0.12$ (pinturas blancas)

$T_{\text{ext}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$



Temperatura en cubierta = **35.16 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **34.75 °C**

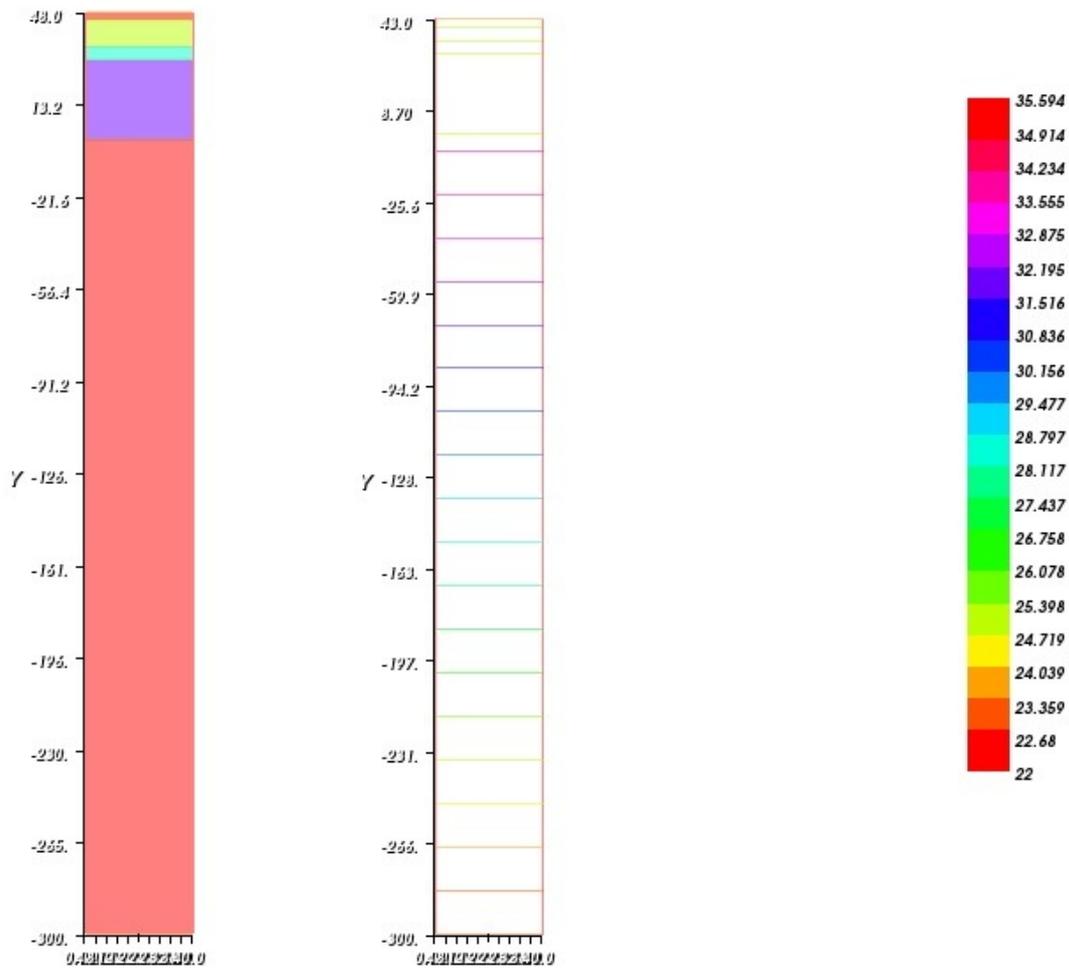
Temperatura a 1m del suelo = **26.24 °C**

09:52

$R = 835 \text{ W/m}^2$

$\alpha = 0.12$ (pinturas blancas)

$T_{\text{ext}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$



Temperatura en cubierta = **35.59 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **35.17 °C**

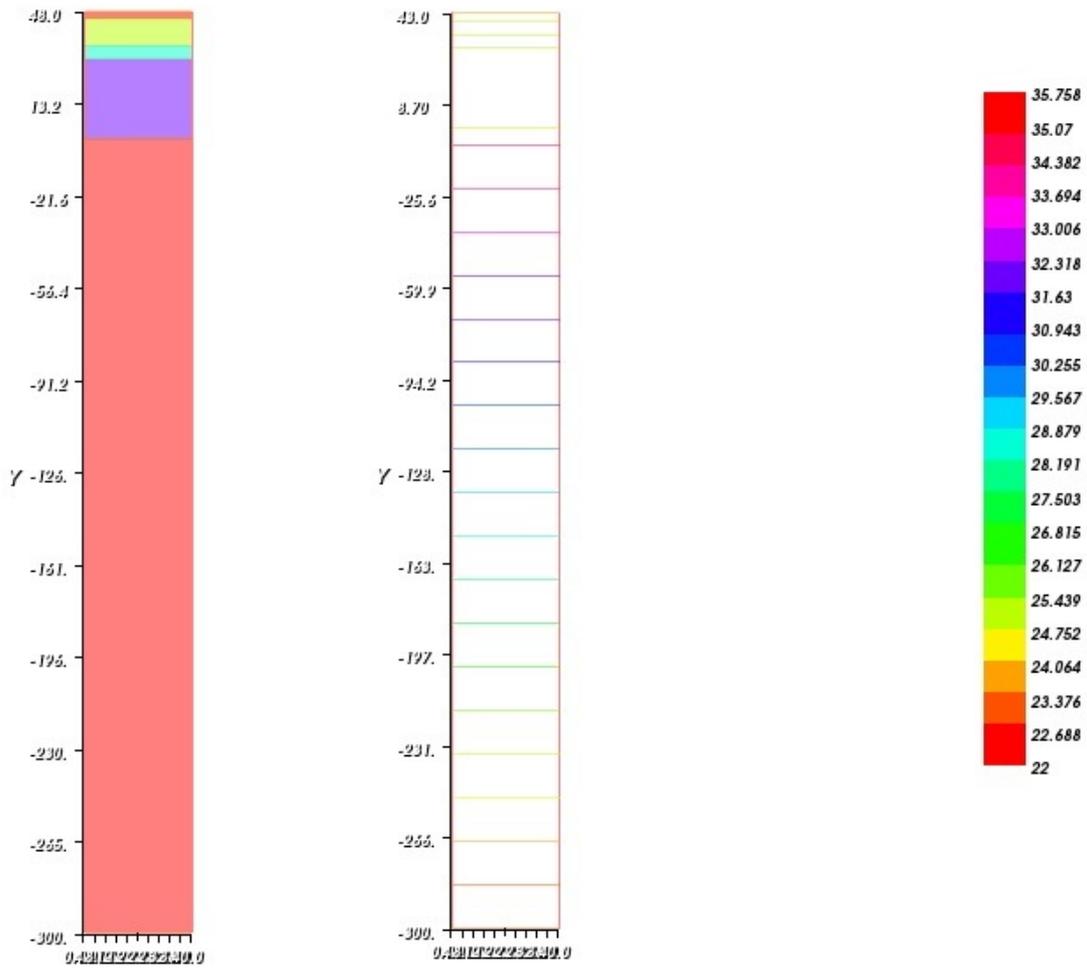
Temperatura a 1m del suelo = **26.39 °C**

11:52

$R = 954 \text{ W/m}^2$

$\alpha = 0.12$ (pinturas blancas)

$T_{\text{ext}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

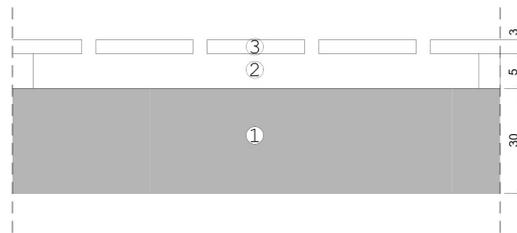


Temperatura en cubierta = **35.76 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **35.33 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **26.43 °C**

4.5. Cálculo de la cámara ventilada a través de las juntas del pavimento



El siguiente caso trata de dar un paso más en la solución constructiva de la cámara ventilada y, provocar además una ventilación a través de las juntas del propio pavimento. De esta manera la cámara de aire es capaz de reducir su temperatura a través de un enfriamiento por convección natural, lo que permite una renovación del aire de la cámara a través de unos posibles huecos en fachada y la propia cubierta. Para llevar a cabo la simulación, se ha impuesto una temperatura exterior en cada una de las juntas, así que no se incrementará la temperatura superficial a causa de la radiación.

Se han estudiado tres casos diferentes cambiando la junta del pavimento 1, 3 y 5 cm.

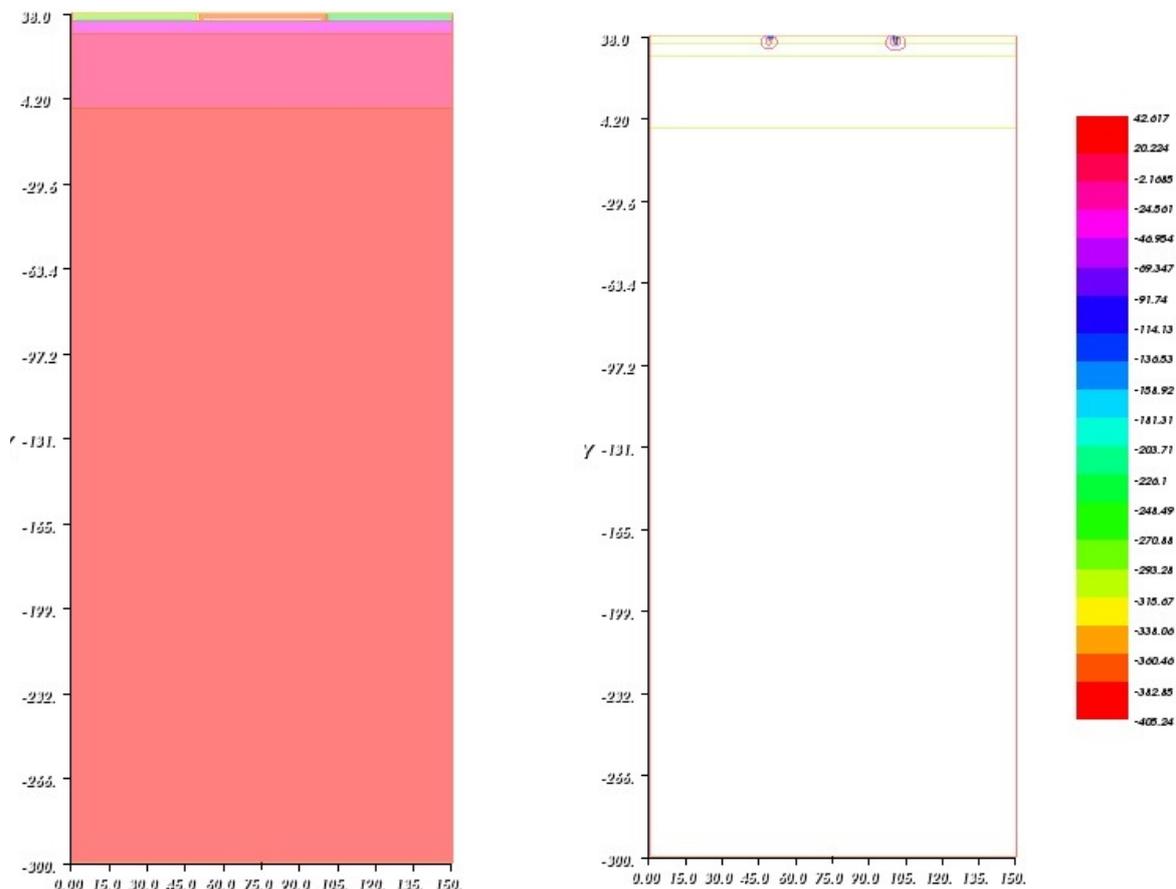
11:52

$R = 954 \text{ W/m}^2$

$\alpha = 0.75$ (ladrillo rojo cerámico)

$T_{\text{ext}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

-Separación de juntas 1 cm

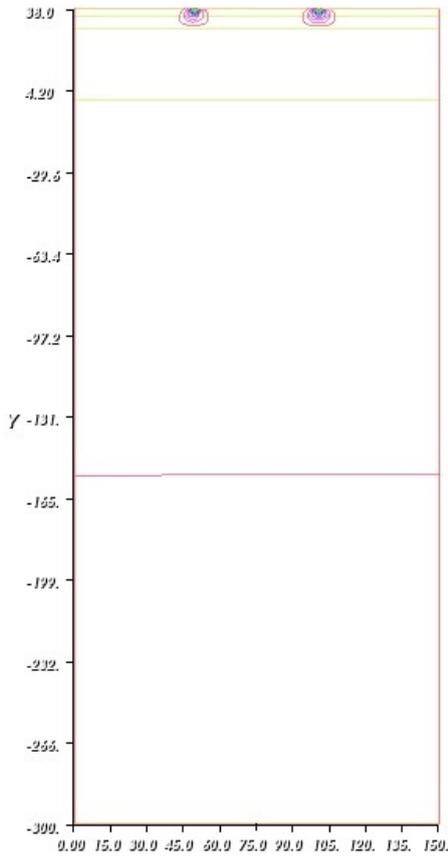


Temperatura en cubierta = **42.60 °C**

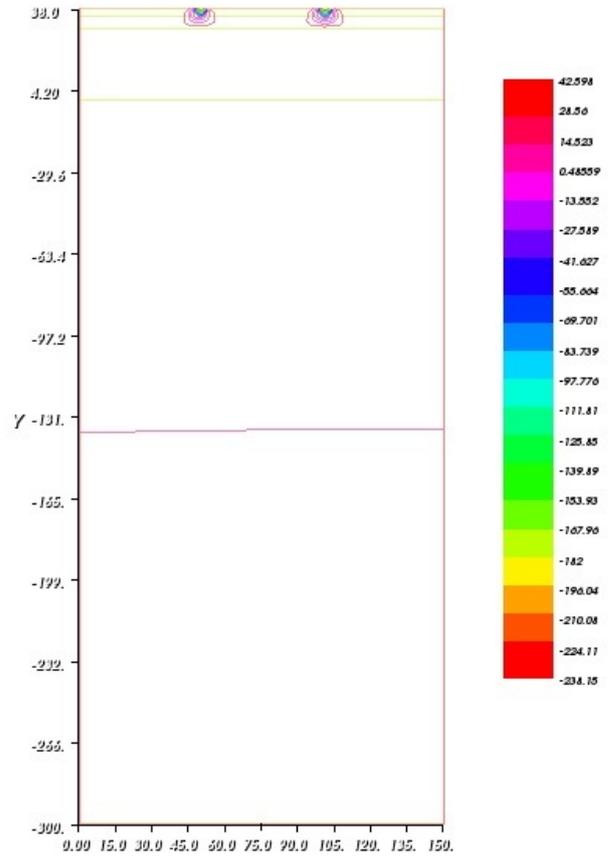
Temperatura en cara interior cubierta = **36.08 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **26.83 °C**

-Separación de juntas 3 cm



-Separación de juntas 5 cm



Temperatura en cubierta = **42.58 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **33.46 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **26.02 °C**

Temperatura en cubierta = **42.57 °C**

Temperatura en cara interior cubierta = **31.99 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **25.56 °C**

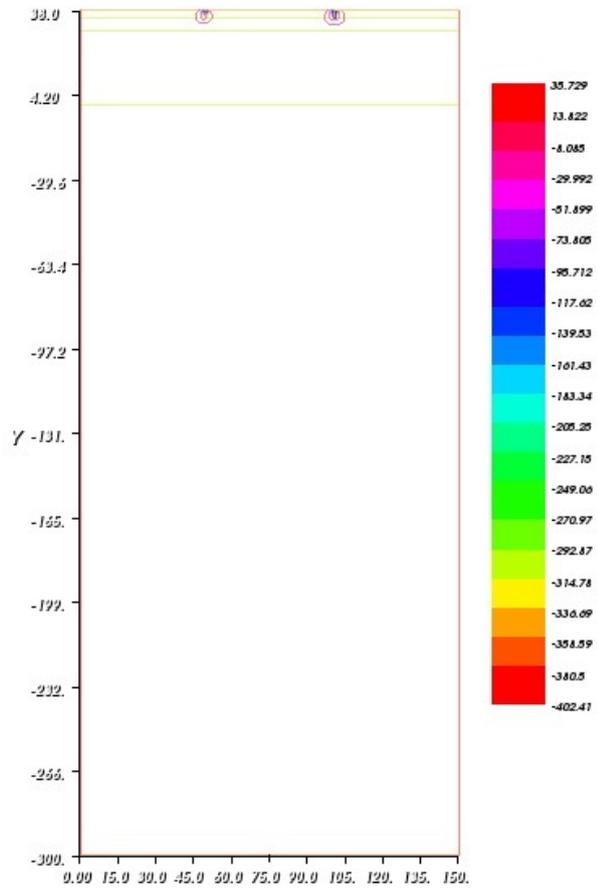
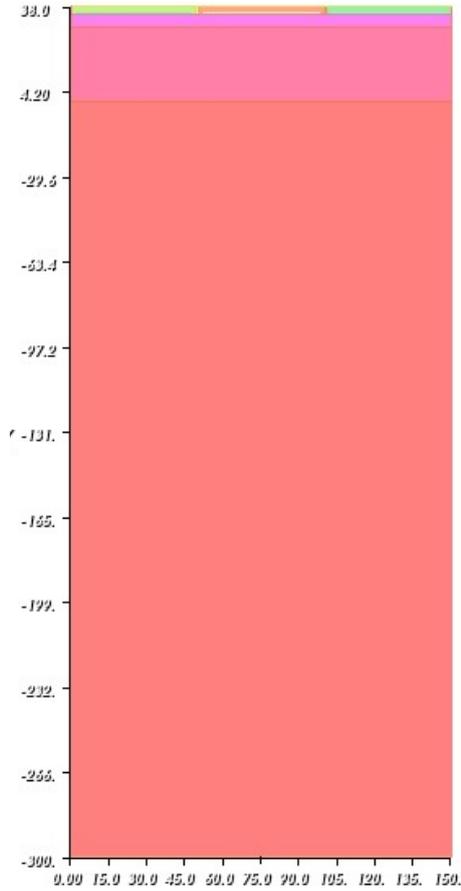
11:52

R = 954 W/m²

$\alpha = 0.12$ (pinturas blancas)

T_{ext} = 35 °C

-Separación de juntas 1 cm

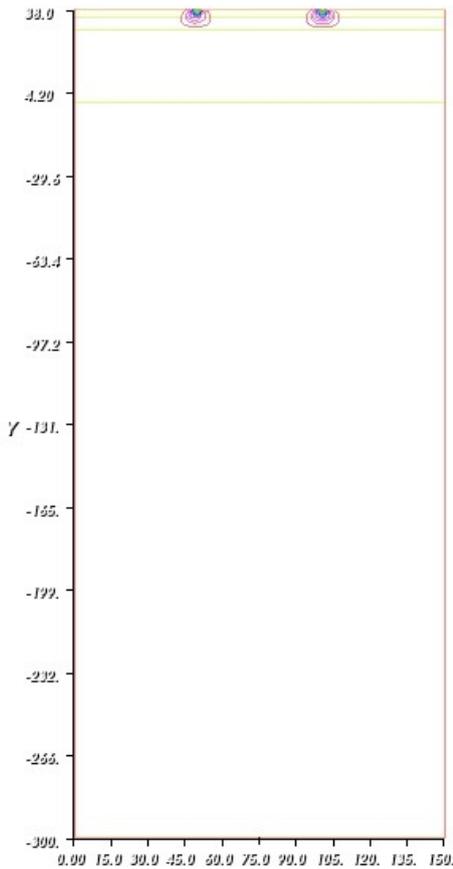


Temperatura en cubierta = **35.72 °C**

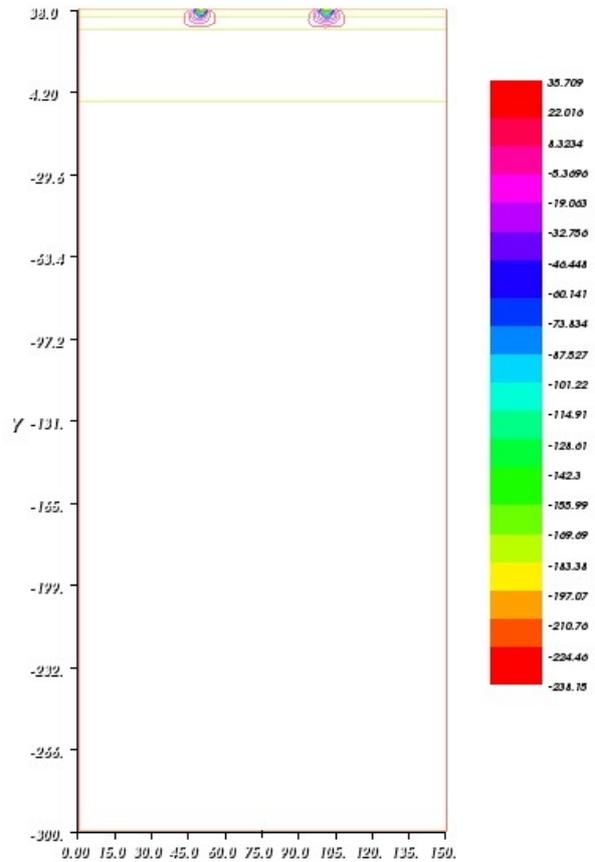
Temperatura en cara interior cubierta = **29.45 °C**

Temperatura a 1m del suelo = **24.62 °C**

-Separación de juntas 3 cm



-Separación de juntas 5 cm



Temperatura en cubierta = **35.70 °C**
Temperatura en cara interior cubierta = **26.90 °C**
Temperatura a 1m del suelo = **23.83 °C**

Temperatura en cubierta = **35.69 °C**
Temperatura en cara interior cubierta = **25.46 °C**
Temperatura a 1m del suelo = **23.38 °C**

Conclusiones

La cámara ventilada con juntas ventiladas a través del pavimento es una solución eficiente para reducir la temperatura interior del edificio. La solución se mejora a medida que aumentamos la separación entre las piezas del pavimento, aunque nunca podrá ser mayor de 4 cm para que funcione correctamente. Si a esto le sumamos un material de alta reflectancia en la cara superior se reduce la temperatura de manera drástica.

4.6. Cálculo solución losa FILTRON

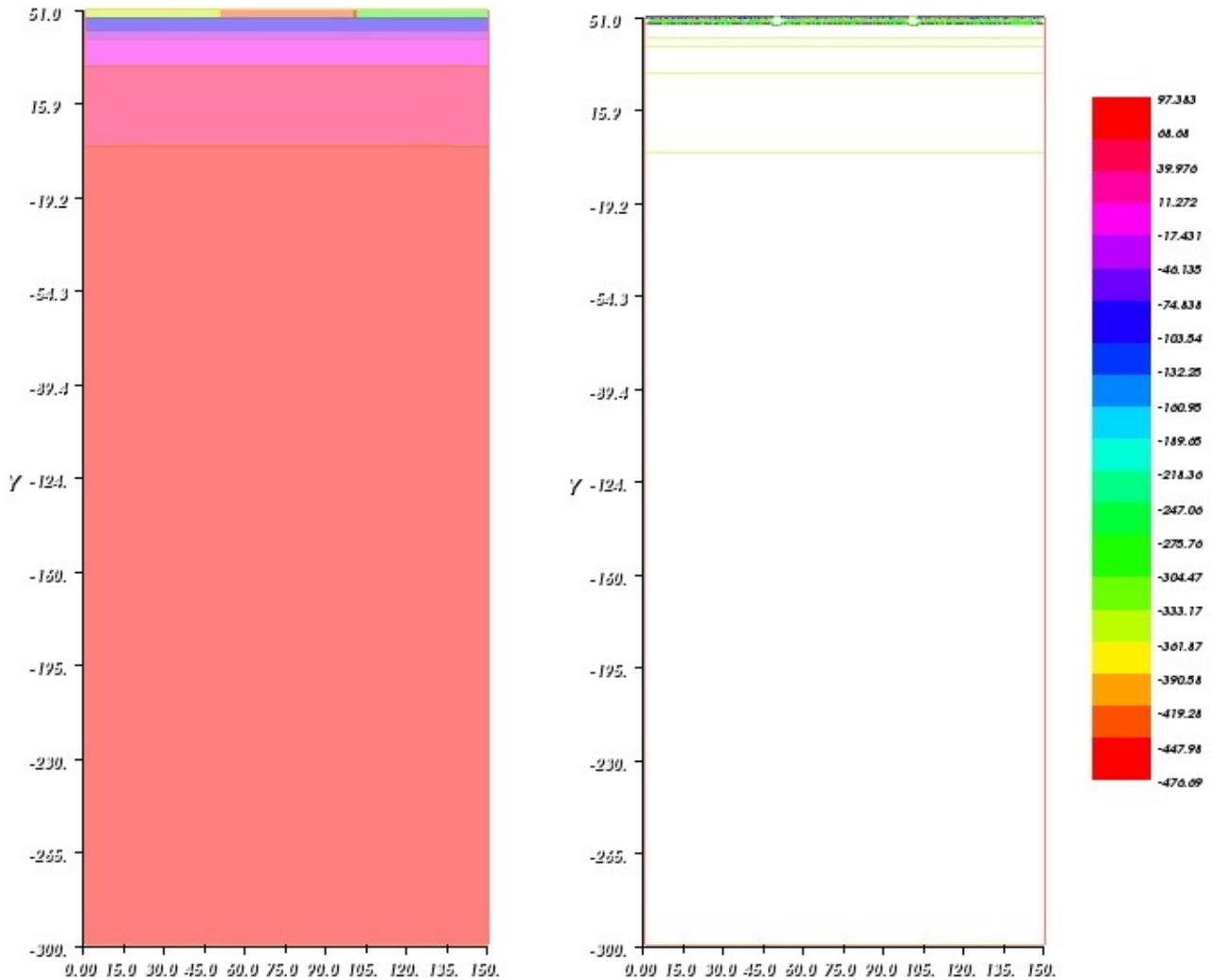
11:52

R = 954 W/m²

$\alpha = 0.75$ (ladrillo rojo cerámico)

T_{ext} = 35 °C

-Separación de juntas 1 cm



Temperatura en cubierta = 42.65 °C

Temperatura en cara interior cubierta = 21.93 °C

Temperatura a 1m del suelo = 21.97 °C

-Separación de juntas 3 cm

Temperatura en cubierta = **42.65 °C**
Temperatura en cara interior cubierta = **21.93 °C**
Temperatura a 1m del suelo = **21.97 °C**

-Separación de juntas 5 cm

Temperatura en cubierta = **42.64 °C**
Temperatura en cara interior cubierta = **21.93 °C**
Temperatura a 1m del suelo = **21.97 °C**

11:52

R = 954 W/m²

$\alpha = 0.12$ (pinturas blancas)

T_{ext} = 35 °C

-Separación de juntas 1 cm

Temperatura en cubierta = **35.76 °C**
Temperatura en cara interior cubierta = **21.93 °C**
Temperatura a 1m del suelo = **21.97 °C**

-Separación de juntas 3 cm

Temperatura en cubierta = **35.76 °C**
Temperatura en cara interior cubierta = **21.93 °C**
Temperatura a 1m del suelo = **21.97 °C**

-Separación de juntas 5 cm

Temperatura en cubierta = **35.76 °C**
Temperatura en cara interior cubierta = **21.93 °C**
Temperatura a 1m del suelo = **21.97 °C**

5. CONCLUSIONES

5.1. Resumen

Las conclusiones que se pueden extraer del presente TFM reflejan la importancia que tiene la arquitectura pasiva en la actualidad, con el fin de reducir el consumo energético de los edificios y las emisiones de CO₂ hacia la atmósfera. Un análisis previo durante la fase de proyecto puede significar un ahorro sustancial a lo largo de la vida útil del edificio, eliminando sistemas de refrigeración o al menos minimizando su uso, lo que nos conduciría a un descenso del 40% de la energía consumida en la edificación.

Este análisis siempre está sujeto a una normativa de obligado cumplimiento, el Código Técnico de la Edificación (CTE), la cual nos limita los valores mínimos y máximos de transmitancia térmica para determinadas soluciones constructivas en función de la severidad climática que le afecte. La raíz del problema se encuentra precisamente en la zonificación de España ya que no se tiene en cuenta el factor de radiación solar. El CTE no pondera dicha variable con el peso suficiente, de modo que las regiones situadas próximas al ecuador, no cumplen las expectativas de confort térmico que se pretenden alcanzar con las soluciones impuestas por la normativa.

Por este motivo, se plantean diferentes estrategias que contribuyan a reducir la temperatura en el interior de los edificios, algunas con más repercusión que otras pero, en cualquier caso, el análisis previo indica la eficiencia que nos aporta cada una de ellas. Todas las soluciones analizadas de manera individual consiguen disminuir la temperatura interior en cuestión, sin embargo, la simultaneidad entre determinadas soluciones es la clave para provocar grandes descensos de temperatura hacia el interior de la envolvente.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las soluciones y se relacionan diferentes parámetros con el fin de lograr cubiertas eficientes desde el punto de vista energético.

5.2. Resultados y conclusiones

Caso 1

INFLUENCIA ESPESOR DEL FORJADO R = 954 W/m ²					
Solución espesor 30 cm			Solución espesor 15 cm		
	$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,12$		$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,12$
T = 28	26,54	24,20	T = 28	26,55	24,21
T = 35	28,89	26,56	T = 35	28,90	26,57

Caso 2

DIFERENTES POSICIONES DEL AISLAMIENTO TÉRMICO R = 954 W/m ²							
Solución aislamiento térmico debajo				Solución aislamiento térmico encima			
	$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,55$	$\alpha = 0,12$		$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,55$	$\alpha = 0,12$
T = 28	25,08	24,59	23,51	T = 28	25,05	24,56	23,50
T = 35	26,70	26,20	25,13	T = 35	26,65	26,16	25,10

DIFERENTES POSICIONES DEL AISLAMIENTO TÉRMICO R = 724 W/m ²							
Solución aislamiento térmico debajo				Solución aislamiento térmico encima			
	$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,55$	$\alpha = 0,12$		$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,55$	$\alpha = 0,12$
T = 35	26,25	25,87	25,06	T = 35	26,20	25,83	25,03

Caso 3

DIFERENTES ESPESORES DE LA CÁMARA VENTILADA $\alpha = 0,75$							
Solución cámara ventilada de 10 cm				Solución cámara ventilada de 5 cm			
	522	835	954		522	835	954
T = 35	27,37	28,22	28,56	T = 35	27,46	28,32	28,66

DIFERENTES ESPESORES DE LA CÁMARA VENTILADA $\alpha = 0,12$							
Solución cámara ventilada de 5 cm				Solución cámara ventilada de 5 cm			
	522	835	954		522	835	954
T = 35	27,46	28,32	28,66	T = 35	26,24	26,39	26,43

Caso 4

VENTILACIÓN A TRAVÉS DE LAS JUNTAS DE PAVIMENTO R = 954 W/m2								
Juntas de 1 cm			Juntas de 3 cm			Juntas de 5 cm		
	$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,12$		$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,12$		$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,12$
T = 35	26,83	24,62	T = 35	26,02	23,83	T = 35	25,56	23,38

Caso 5

SOLUCIÓN LOSA FILTRON R = 954 W/m2								
Juntas de 1 cm			Juntas de 3 cm			Juntas de 5 cm		
	$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,12$		$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,12$		$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,12$
T = 35	22,00	22,00	T = 35	22,00	22,00	T = 35	22,00	22,00

Resultados de temperatura interior a 1 m sobre el suelo

SOLUCIÓN LOSA FILTRON R = 954 W/m2								
Juntas de 1 cm			Juntas de 3 cm			Juntas de 5 cm		
	$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,12$		$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,12$		$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,12$
T = 35	42,65	35,76	T = 35	42,65	35,76	T = 35	42,65	35,76

Resultados de temperatura en la cara exterior del forjado

En primer lugar se demuestra la importancia de la absorptividad en beneficio del ahorro material. Un mayor aumento del espesor del forjado de 15 a 30 cm implica una reducción de la temperatura en 0,1 °C, lo cual nos lleva a pensar que la elección de un material de baja absorptividad con un color claro es más eficiente que un aumento de la sección del material. La mejora entre la utilización de un material de alta absorptividad y otro de baja absorptividad, es evidente ya que se reduce la temperatura en 2,5 °C, con temperaturas exteriores que oscilan entre 28 y 35 °C.

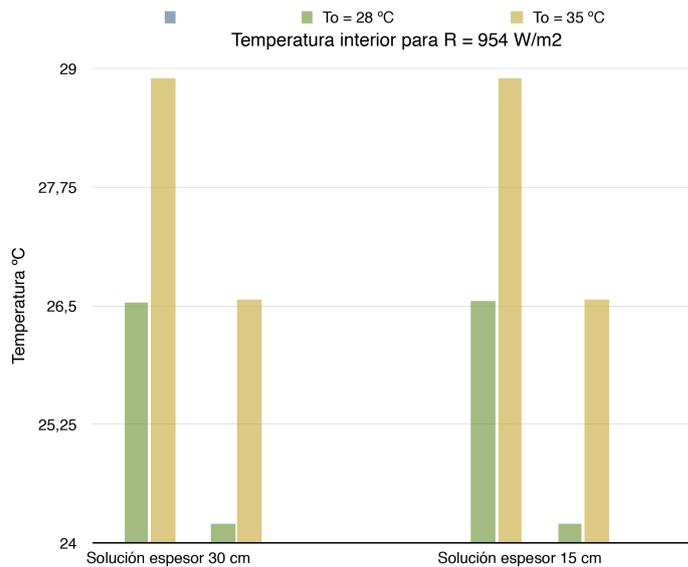


Figura 5.2.1: Comparativa entre cubiertas con diferente sección

El segundo caso confirma un dato que conocíamos de antemano, ya que el aislante térmico es conveniente colocarlo en la capa externa si queremos disipar el calor antes de que entre en el edificio, aunque la variación sea mínima. Con esta solución, se reduce la temperatura en torno a $0,05 \text{ °C}$. Sin embargo, volvemos a observar que los grandes saltos de temperatura se producen cuando aplicamos materiales con baja absorptividad y alta reflectancia.

En zonas frías nos podemos plantear la situación inversa al colocar el aislamiento térmico, ya que es necesario aportar calor en el interior del edificio.

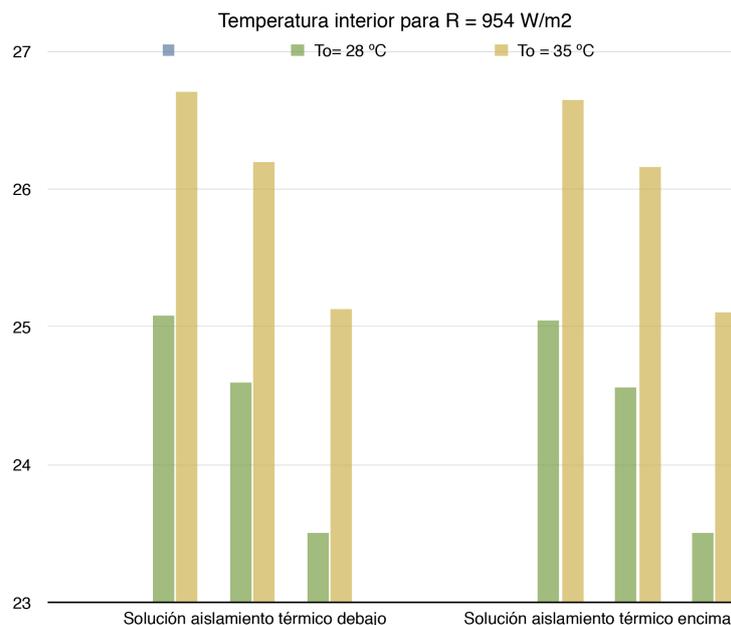


Figura 5.2.2: Comparativa con diferente posicionamiento del AT

En el tercer caso se analizan dos soluciones de cámara ventilada de 5 y 10 cm, y se puede observar que una cámara de aire con un pavimento de ladrillo cerámico oscuro es una mala solución por la alta absorción del acabado, ya que no entra dentro del rango de confort existente para la zona de estudio según MABICAN. La temperatura desciende ligeramente, en torno a 1 °C, al aumentar el espesor de 5 a 10 cm.

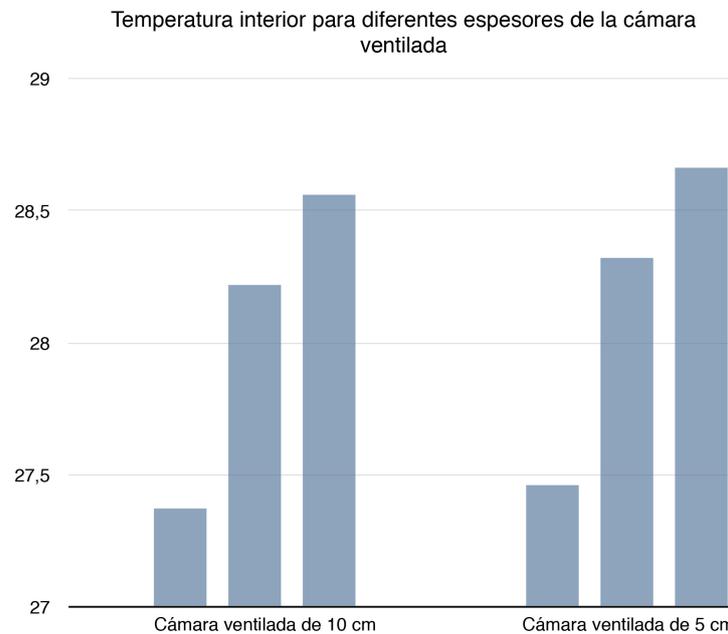


Figura 5.2.3: Comparativa para diferentes espesores de la cámara ventilada

El cuarto caso, es bastante acertado ya que las juntas del pavimento permiten el paso del aire para conseguir reducir la temperatura en el interior de la zona de estudio. Con esta solución la temperatura desciende a medida que aumentamos el espesor de las juntas del pavimento, logrando así 26,83 °C, 26,02 °C y 25,56 °C, para una separación de juntas de 1, 3 y 5 cm, respectivamente. Esto quiere decir que a mayor separación del pavimento ventilado menor será la temperatura interior. La solución se mejora al aplicar materiales con alta reflectancia ($\alpha = 0.12$), consiguiendo descensos de temperatura de 1,20 °C.

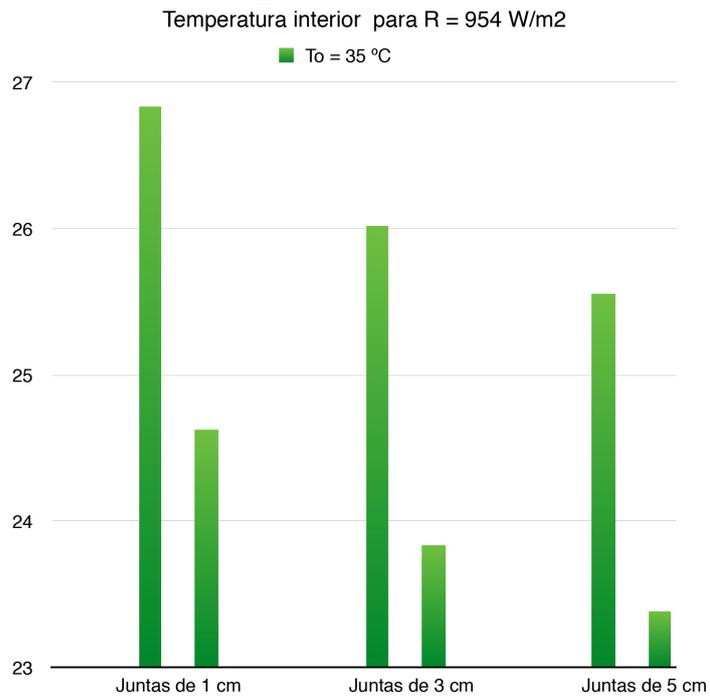


Figura 5.2.4: Comparativa entre diferentes separaciones de la junta del pavimento

El quinto y último caso, ofrece los resultados más satisfactorios para reducir la temperatura en el interior del edificio. Para los tres ejemplos con diferentes absorptividades se obtiene una temperatura interior menor a los 22° C, todas muy similares. La combinación entre la cámara y las juntas ventiladas, con un pavimento elevado de baja conductividad térmica, Esto refleja que la solución tiende a estabilizarse al disminuir tanto la temperatura y, ni la separación de las juntas del pavimento, ni el cambio de absorptividad implican variaciones con una gran repercusión en la solución final.

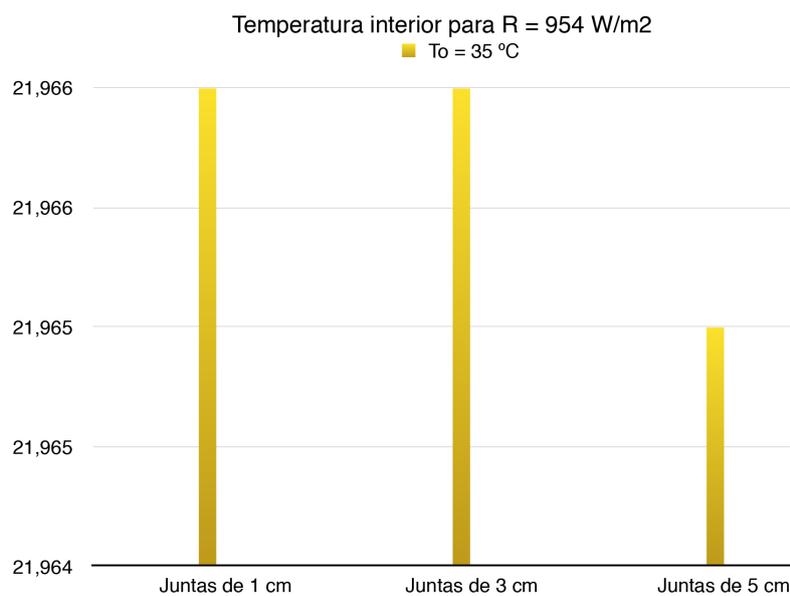


Figura 5.2.5: Comparativa entre diferentes separaciones de la junta del pavimento (losa FILTRON)

5.3. Comentarios finales

A lo largo de la investigación de este TFM se ha demostrado que la actual normativa vigente en España para la edificación (CTE) , carece de un modelo real para Canarias, por lo que es necesaria una actualización que incorpore la variable de radiación con el peso suficiente para definir correctamente las zonas climáticas del DB HE.

Aceptando esta premisa, las simulaciones realizadas con el software FreeFem nos aporta unos resultados que contribuyen al ahorro energético y afirman con rotundidad la importancia de la arquitectura pasiva en la edificación:

-Los materiales con baja absortividad y colores claros contribuyen favorablemente a disipar la radiación en la capa más externa de la cubierta.

-El aumento de la sección del forjado supone un gasto material que no compensa con la reducción de temperatura que aporta.

-En climas subtropicales el aislamiento térmico colocado en la capa superior, siempre implica un descenso de temperatura mayor que colocarlo por debajo del resto de materiales que componen la cubierta.

-Una solución de cubierta con una cámara ventilada sin una refrigeración correcta, funciona peor que una solución de cubierta tradicional con el AT idóneo.

-Una cubierta que permita la ventilación a través de sus juntas contribuye de manera positiva al enfriamiento de la cubierta, disminuyendo la temperatura de manera inversamente proporcional a la separación del pavimento.

-Si a la solución anterior de cámara de aire más juntas autoventiladas le sumamos un pavimento tipo losa filtrón con un AT, la reducción de temperatura es máxima, llegando a los 22°C con una T_{ext} de 35° C.

6.BIBLIOGRAFIA

- [1] Holman, J.P. (1998). *Transferencia de calor* (8ª Edición). Madrid: McGRAW-HILL.
- [2] Ramamurthy, P., Sun, T., Rule, K., & Bou-Zeid, E. (Junio 2015). *The joint influence of albedo and insulation on roof performance: A modeling study*. New York.
- [3] Shanshan Tong., Hua Li, Kishor T., Man Pun Wan., Swee Khian Wing et al (Febrero 2014). *Thermal performance of concrete-based roofs in tropical climate*. Singapore.
- [4] Stephan K. and Laesecke A. (1985). *The thermal conductivity of Fluid Air*. Stuttgart.
- [5] Hecht, Frédéric. *FreeFem ++*(3ª Edición). París, Francia.
- [6] Alqallaf H.J., Alawadhi E.M (Enero 2013). *Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain*. Kuwait.
- [7] Lago Navia D. (Abril 2012). *Caracterización térmica de la fachada de un edificio histórico en Valencia*. Valencia.
- [8] De Luxán García de Diego, Margarita, Reymundo Izard, Araceli(Marzo 2013). *Manual de diseño bioclimático para Canarias*. España.
- [9] W.H. McAdams (1954). *Heat Transmission* (3ª edición). Nueva York: McGRAW-HILL. 339-348.
- [10] W.C. Swinbank, Long-wave radiation from clear skies, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 89 (1963). 339-348.
- [11] MINISTERIO DE VIVIENDA. Código Técnico de la Edificación (Marzo 2010). *Catálogo de elementos constructivos del CTE*. Instituto Eduardo Torroja. Madrid.
- [12] MINISTERIO DE VIVIENDA. Código Técnico de la Edificación. (Septiembre 2013). *Documento Básico HE1. Limitación de la demanda energética*. Madrid.
- [13] *Datos de radiación solar*. [en línea]. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa> (consulta, 13 de Septiembre de 2015)
- [14] *Datos de viento*. [en línea]. <http://www.windguru.cz/es/index.php?sc=238> (consulta, 13 de Septiembre de 2015)

7. ANEXOS.

7.1. Anexo I. Mallado de soluciones con Freefem

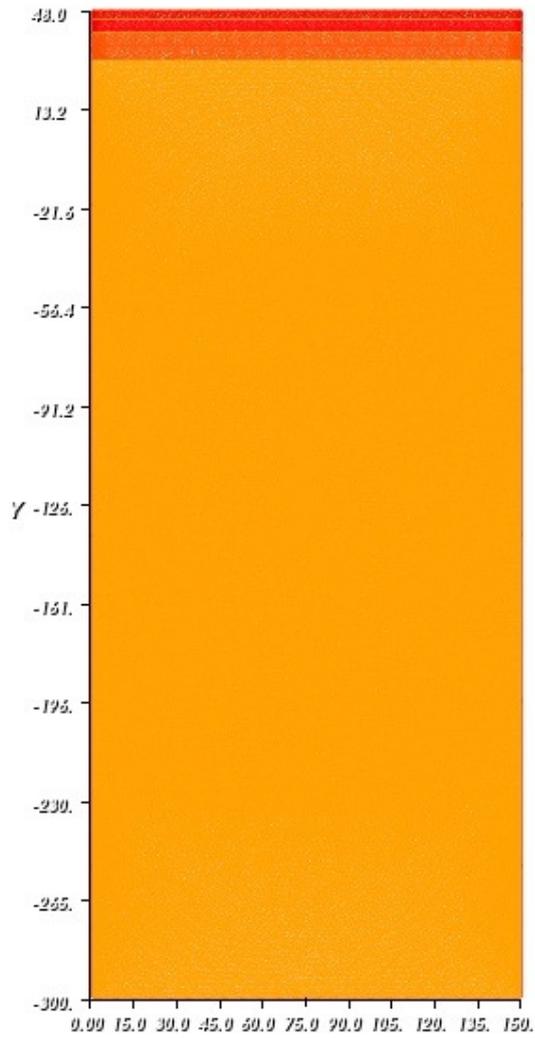


Figura 7.1: Caso 2 AT encima

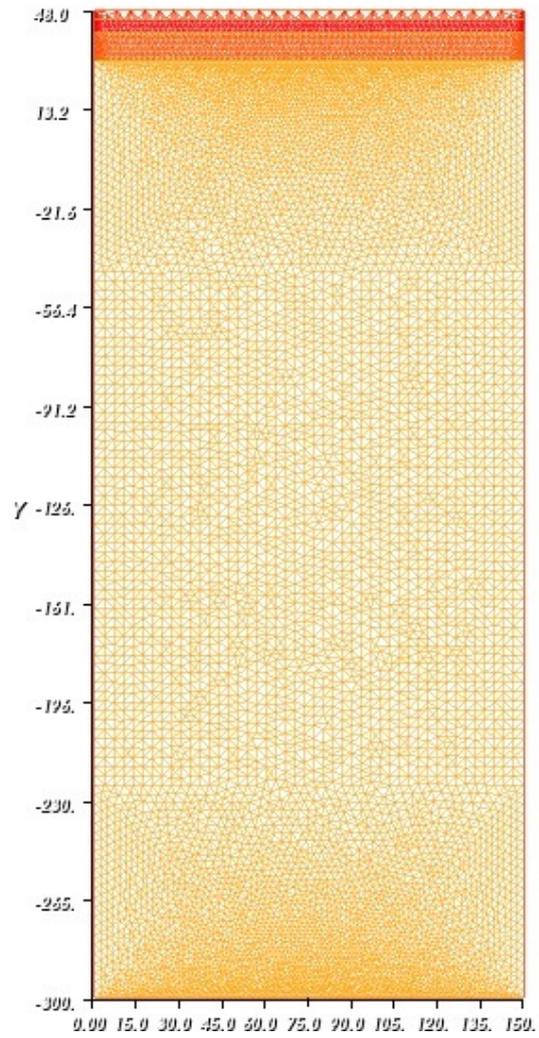


Figura 7.2: Caso 2 AT debajo

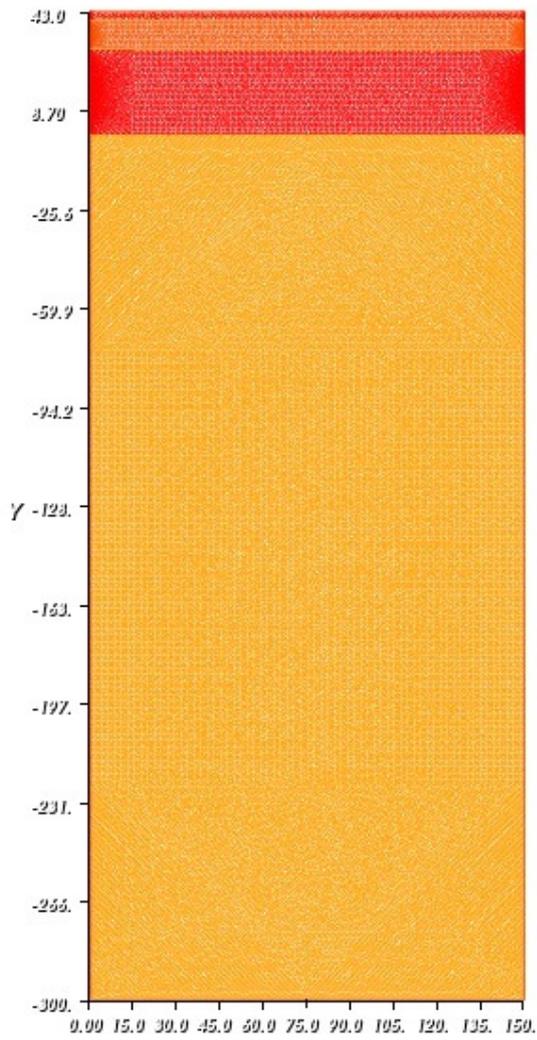


Figura 7.3: Caso 1 espesor 30 cm forjado

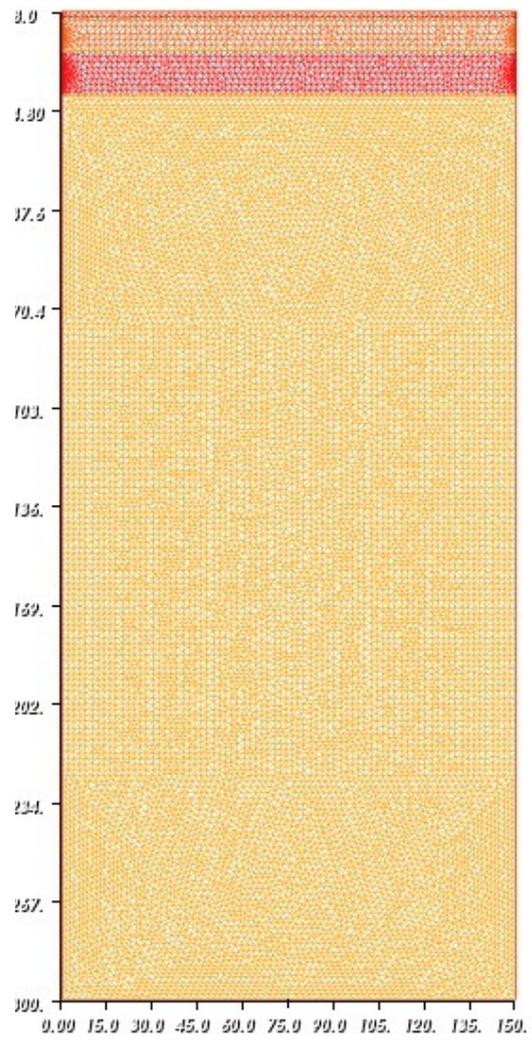


Figura 7.4: Caso 1 espesor 15 cm forjado

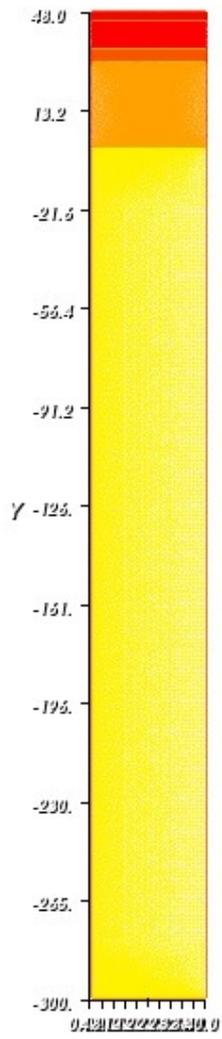


Figura 7.5: Caso 3 cámara ventilada

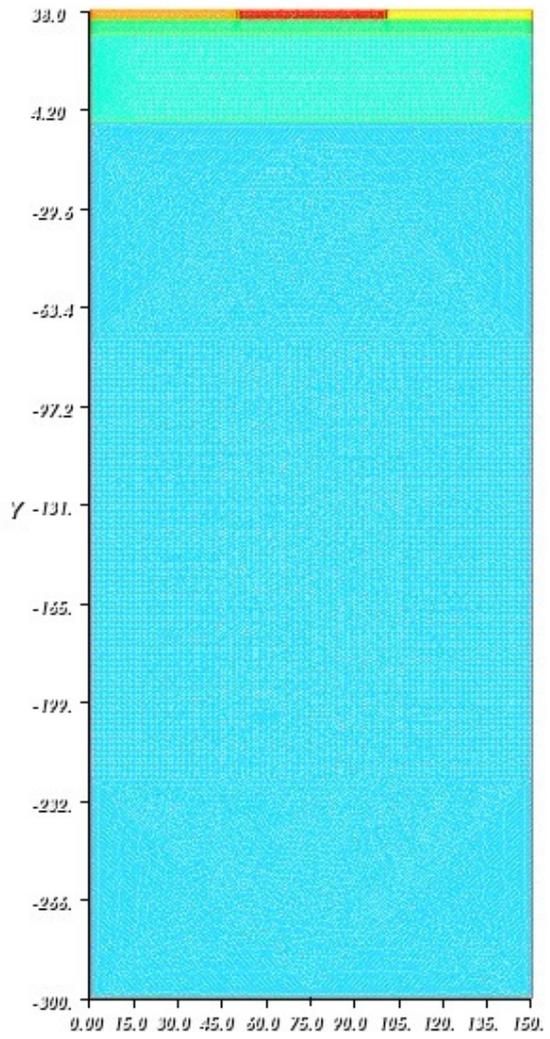


Figura 7.6: Caso 4 juntas ventiladas

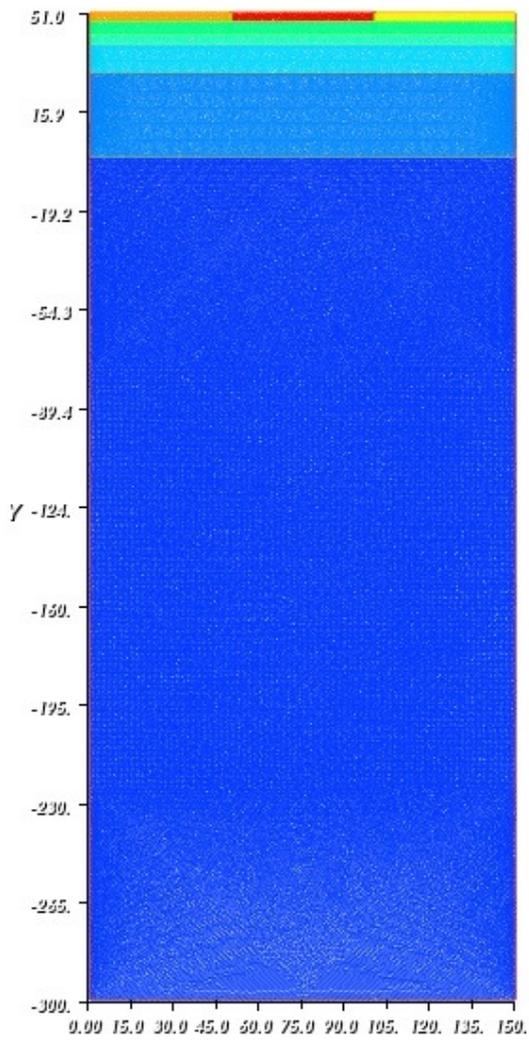


Figura 7.7: Caso losa FILTRON

7.2. Anexo II. Datos de radiación para el mes de Junio

SAN BARTOLOMÉ DE TIRAJANA 27°			
Time	G	G	G _c
05:37	77	57	61
05:52	119	77	101
06:07	165	95	147
06:22	215	111	197
06:37	266	127	250
06:52	318	141	305
07:07	370	153	361
07:22	422	165	417
07:37	473	175	473
07:52	522	183	528
08:07	570	190	581
08:22	616	197	633
08:37	659	202	682
08:52	700	206	729
09:07	738	209	774
09:22	773	211	815
09:37	806	213	853
09:52	835	214	888
10:07	861	215	919
10:22	884	215	947
10:37	904	215	971
10:52	921	215	991
11:07	934	215	1010
11:22	944	215	1020
11:37	951	214	1030
11:52	954	214	1030
12:07	954	214	1030
12:22	951	214	1030
12:37	944	215	1020
12:52	934	215	1010
13:07	921	215	991
13:22	904	215	971
13:37	884	215	947
13:52	861	215	919
14:07	835	214	888
14:22	806	213	853
14:37	773	211	815
14:52	738	209	774
15:07	700	206	729
15:22	659	202	682
15:37	616	197	633
15:52	570	190	581
15:37	601	192	633
15:52	557	186	581
16:07	511	179	528
16:22	463	171	473
16:37	413	161	417
16:52	363	151	361
17:07	312	138	305
17:22	261	125	250
17:37	211	110	197
17:52	163	93	147
18:07	117	76	101
18:22	76	57	61
18:37	42	37	31

TATA 23°			
Time	G	G	G
05:22	32	32	29
05:37	71	49	67
05:52	111	65	106
06:07	157	80	151
06:22	207	94	199
06:37	259	108	250
06:52	314	120	303
07:07	369	131	358
07:22	424	141	412
07:37	479	149	466
07:52	533	157	520
08:07	586	164	572
08:22	637	169	622
08:37	686	174	670
08:52	732	178	716
09:07	775	182	759
09:22	816	184	800
09:37	853	186	837
09:52	888	188	871
10:07	918	189	901
10:22	945	190	928
10:37	969	190	952
10:52	988	190	971
11:07	1000	191	987
11:22	1020	191	999
11:37	1020	191	1010
11:52	1030	191	1010
12:07	1030	191	1010
12:22	1020	191	1010
12:37	1020	191	999
12:52	1000	191	987
13:07	988	190	971
13:22	969	190	952
13:37	945	190	928
13:52	918	189	901
14:07	888	188	871
14:22	853	186	837
14:37	816	184	800
14:52	775	182	759
15:07	732	178	716
15:22	686	174	670
15:37	637	169	622
15:52	586	164	572
16:07	534	157	520
16:22	479	149	467
16:37	424	140	412
16:52	369	131	358
17:07	314	120	304
17:22	259	108	250
17:37	207	94	199
17:52	157	80	151
18:07	112	65	106
18:22	71	49	67
18:37	39	32	36
18:52	14	14	13

TOLEDO 40°			
Time	G	G	G
04:52	27	27	23
05:07	41	41	35
05:22	87	55	85
05:37	122	68	123
05:52	160	80	165
06:07	200	91	210
06:22	242	102	257
06:37	285	112	306
06:52	328	121	355
07:07	372	129	405
07:22	415	137	455
07:37	457	143	504
07:52	498	149	552
08:07	538	154	599
08:22	577	158	644
08:37	613	162	687
08:52	648	165	728
09:07	680	167	767
09:22	711	169	803
09:37	738	170	837
09:52	764	171	867
10:07	786	172	894
10:22	806	173	918
10:37	823	173	939
10:52	838	173	957
11:07	849	173	971
11:22	858	173	981
11:37	864	173	989
11:52	867	173	992
12:07	867	173	992
12:22	864	173	989
12:37	858	173	981
12:52	849	173	971
13:07	838	173	957
13:22	823	173	939
13:37	806	173	918
13:52	786	172	894
14:07	764	171	867
14:22	738	170	837
14:37	711	169	803
14:52	680	167	767
15:07	648	165	728
15:22	616	159	688
15:37	579	156	644
15:52	540	152	599
16:07	500	147	552
16:22	458	141	504
16:37	416	135	455
16:52	372	127	405
17:07	329	119	355
17:22	285	110	306
17:37	242	100	257
17:52	200	90	210
18:07	159	79	165
18:22	121	67	123
18:37	87	55	85
18:52	56	41	53
19:07	27	27	23
19:22	13	13	11

PAMPLONA 43°			
Time	G	G	G
04:52	50	42	42
05:07	76	57	69
05:22	105	72	103
05:37	137	86	141
05:52	170	99	183
06:07	205	112	227
06:22	240	123	273
06:37	276	134	320
06:52	311	144	368
07:07	346	153	416
07:22	381	161	464
07:37	414	168	512
07:52	447	174	558
08:07	478	180	603
08:22	507	184	646
08:37	535	188	688
08:52	562	191	727
09:07	586	194	764
09:22	609	196	799
09:37	630	198	831
09:52	649	199	860
10:07	665	200	886
10:22	680	200	910
10:37	693	201	930
10:52	703	201	946
11:07	712	201	960
11:22	718	201	970
11:37	722	201	977
11:52	724	201	980
12:07	724	201	980
12:22	722	201	977
12:37	718	201	970
12:52	712	201	960
13:07	703	201	946
13:22	693	201	930
13:37	680	200	910
13:52	665	200	886
14:07	649	199	860
14:22	630	198	831
14:37	609	196	799
14:52	586	194	764
15:07	562	191	727
15:22	529	190	688
15:37	502	186	646
15:52	473	181	603
16:07	442	176	558
16:22	411	169	512
16:37	378	162	464
16:52	344	154	416
17:07	309	145	368
17:22	275	135	320
17:37	239	124	273
17:52	205	113	227
18:07	170	100	183
18:22	137	87	141
18:37	106	73	103
18:52	76	58	69
19:07	43	43	29
19:22	27	27	18

CADIZ 36°			
Time	G	G	G
05:07	49	36	41
05:22	82	49	73
05:37	120	62	112
05:52	162	74	157
06:07	206	85	205
06:22	253	96	256
06:37	300	105	308
06:52	347	114	361
07:07	395	121	414
07:22	441	128	467
07:37	487	134	520
07:52	532	139	571
08:07	575	144	621
08:22	616	147	669
08:37	655	150	715
08:52	692	152	758
09:07	727	154	800
09:22	759	155	838
09:37	788	156	873
09:52	815	157	905
10:07	839	157	934
10:22	860	157	960
10:37	879	157	982
10:52	894	157	1000
11:07	906	157	1020
11:22	916	156	1030
11:37	922	156	1030
11:52	925	156	1040
12:07	925	156	1040
12:22	922	156	1030
12:37	916	156	1030
12:52	906	157	1020
13:07	894	157	1000
13:22	879	157	982
13:37	860	157	960
13:52	839	157	934
14:07	815	157	905
14:22	788	156	873
14:37	759	155	838
14:52	727	154	800
15:07	692	152	758
15:22	655	150	715
15:37	606	146	667
15:52	566	142	619
16:07	523	138	569
16:22	480	133	518
16:37	434	127	466
16:52	388	120	413
17:07	342	112	360
17:22	295	104	307
17:37	249	94	255
17:52	203	84	205
18:07	159	73	156
18:22	118	61	112
18:37	80	49	72
18:52	48	36	40
19:07	24	22	18

- G: Global irradiance on a fixed plane (W/m²)
- G_d: Diffuse irradiance on a fixed plane (W/m²)
- G_c: Global clear-sky irradiance on a fixed plane (W/m²)
- DNI: Direct normal irradiance (W/m²)
- DNI_c: Clear-sky direct normal irradiance (W/m²)
- A: Global irradiance on 2-axis tracking plane (W/m²)
- A_d: Diffuse irradiance on 2-axis tracking plane (W/m²)
- A_c: Global clear-sky irradiance on 2-axis tracking plane (W/m²)

7.2. Anexo III. Datos de viento

MEDIA AÑO TÍPICO SEGÚN ESTACIÓN DE GANDO											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agost	Septie	Octu	Nov	Dic
12	14	15	16	18	20	24	22	16	13	13	11

Estadísticas basadas en observaciones medidas del 10/2000 - 09/2015 diariamente entre 7 am y 7 pm hora local.