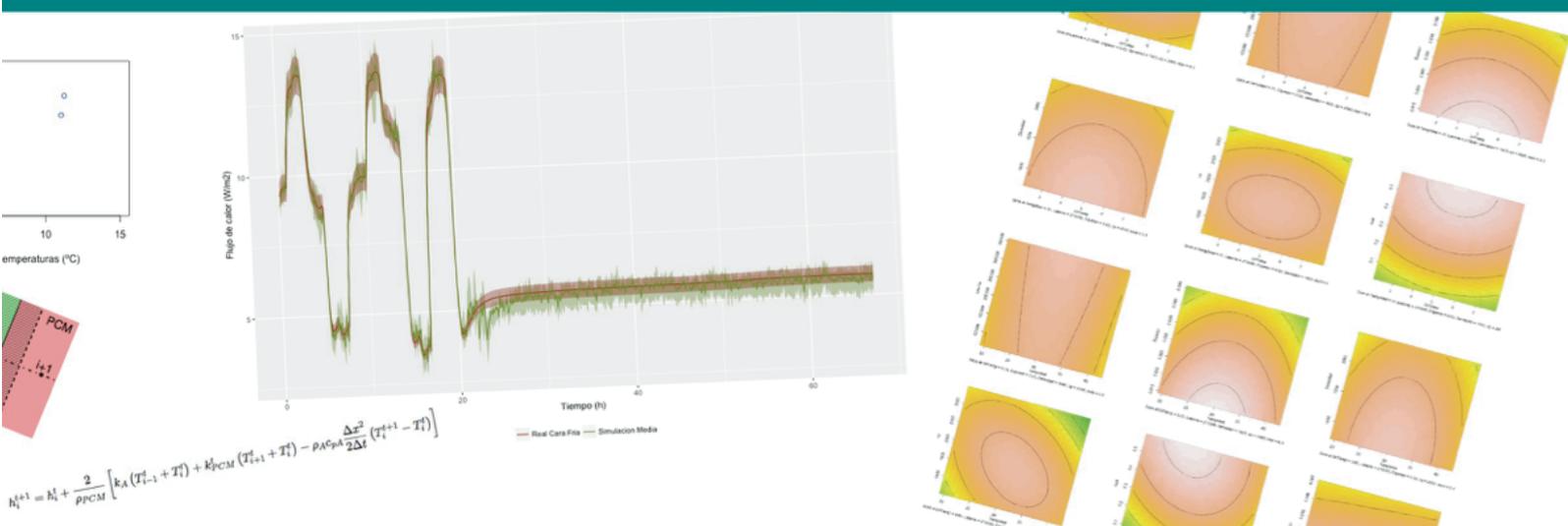


# Método de Cálculo del Comportamiento Térmico de Cerramientos de Edificios con Materiales de Cambio de Fase



Aitor Urresti González

Director:

Dr Jose María Sala Lizarraga



Universidad del País Vasco

Euskal Herriko Unibertsitatea

Año: 2017



# TESIS DOCTORAL

---

## Método de Cálculo del Comportamiento Térmico de Cerramientos de Edificios con Materiales de Cambio de Fase

---

Presentada por:

**Aitor Urresti González**

Para aspirar al grado de:

**Doctor Ingeniero Industrial**

**Director de Tesis:** Dr. José María Sala Lizarraga

Bilbao, mayo de 2017



# Resumen

El agotamiento de los combustibles fósiles sobre los que se basa nuestro sistema energético, unido al cada vez más rápido calentamiento global, nos aboca a una transición hacia un modelo energético basado en el ahorro, la eficiencia energética y las energías renovables. Ante este nuevo escenario, el almacenamiento de energía es uno de los elementos clave, almacenando la energía disponible de fuentes de energía intermitentes, como la eólica o la solar, para su posterior aprovechamiento en los momentos en los que exista demanda. El presente trabajo se centra en la aplicación del almacenamiento térmico en forma de calor latente, en la envolvente de edificios, mediante materiales de cambio de fase o PCM.

Los materiales de cambio de fase intercambian gran cantidad de energía durante la transición, en forma de calor latente. Esto supone que es necesario menor cantidad de material para almacenar la misma cantidad de energía, si se compara con los materiales convencionales. Además, durante la transición de fase la temperatura se mantiene prácticamente constante, con lo que se consigue estabilizar las temperatura interior, mejorando de esta manera el confort térmico.

Sin embargo, el proceso de intercambio de calor durante el cambio de fase es fuertemente no lineal. Para un correcto funcionamiento de los materiales de cambio de fase, es preciso analizar las propiedades más adecuadas para cada ubicación y tipo de uso. La modelización previa del comportamiento térmico de los PCMs resulta por lo tanto de vital importancia a la hora de implantar este tipo de materiales.

Esta tesis analiza el proceso completo para definir el material más adecuado para los cerramientos de edificios: desde los métodos de medición de propiedades, pasando por los métodos de cálculo, para terminar definiendo las propiedades más adecuadas para una aplicación concreta.

Los parámetros más importantes en los materiales de cambio de fase son el calor latente, y el intervalo de temperaturas de cambio de fase. Estos normalmente se miden empleando la calorimetría diferencial de barrido o DSC. Además, en el presente trabajo se plantea el uso de un conductivímetro para medir el comportamiento térmico de estos materiales. De esta forma, se han obtenido los datos experimentales necesarios para validar los métodos de cálculo propuestos.

Para la simulación del comportamiento térmico de estos materiales, el enfoque más habitual es el uso de los métodos en diferencias finitas. En el presente trabajo se ha planteado el empleo de los métodos de aprendizaje automático, concretamente el método de las redes



neuronales. Este tipo de métodos resultan muy adecuados para procesos no lineales, como los que suceden durante la transferencia de calor en el cambio de fase. Como desventaja, el uso de estos métodos no es de aplicación universal, y requieren de datos experimentales previos para cada tipo de material. El uso del conductivímetro puede ser una buena manera de obtener estos datos experimentales con facilidad. Sin embargo, en el presente trabajo se ha demostrado que este tipo de métodos presentan mala generalización, de manera que no son capaces de simular correctamente situaciones que difieran de manera significativa de los datos experimentales empleados en su creación. La gran disparidad de condiciones a las que se enfrenta un material de cambio de fase en el cerramiento de un edificio hace que sea inviable disponer de datos experimentales suficientes para obtener unos resultados viables. Por este motivo se ha terminado desestimando este tipo de métodos, para emplear el método más tradicional de diferencias finitas para la simulación del comportamiento térmico de estos materiales.

Como ya se ha comentado, es necesario analizar las propiedades óptimas para cada tipo de aplicación. Se han identificado ocho propiedades termofísicas que se deben definir, y cinco parámetros distintos a analizar: la demanda total de energía, demanda de calefacción, demanda de refrigeración, demanda exergética y transmitancia exergética. Se debe analizar por lo tanto un problema multidimensional, con lo que se decide aplicar un diseño de experimentos para realizar el análisis de manera completa.

Como fruto de este análisis, se concluye que para el cubículo analizado en la ciudad de Vitoria-Gasteiz, la aplicación del material de cambio de fase por el exterior no presenta apenas ninguna ventaja sobre el empleo de materiales convencionales. Sin embargo su aplicación por el interior sí que consigue reducir la demanda energética, de manera notable para el caso de la demanda de refrigeración. Se observa además que las propiedades óptimas para cada una de las demandas y parámetros analizados difieren. Se debe plantear por lo tanto con antelación el objetivo que deben cumplir estos materiales, para definir sus propiedades óptimas. Se concluye también que el uso de materiales no puros, con intervalos de cambio de fase muy amplios, también ofrecen buenos resultados, al contrario de lo publicado en la literatura.

**Palabras clave:** Cerramientos de edificios; Materiales de Cambio de fase; Transferencia de calor; Métodos de cálculo; Diseño de experimentos

# Agradecimientos

Esta tesis es el resultado de muchos años de trabajo. Han sido años repletos de vivencias en las que he ido poco a poco hilvanando los distintos aspectos que culminan ahora con este libro. Pero, lejos de ser el resultado únicamente de mi esfuerzo personal, este es el fruto de un esfuerzo compartido. En parte porque muchos de los datos presentados y planteamientos que aquí se hacen, son el resultado del trabajo conjunto con bastante gente. Pero también porque nada de esto habría sido posible sin el apoyo y el acompañamiento de mucha gente que fuera del ámbito de la investigación me han apoyado y me han impulsado a terminar este trabajo, además de perdonarme muchas ausencias (en ocasiones físicas, y demasiadas veces mentales) y malos ratos. Estoy seguro de que se me quedará alguien en el tintero de los agradecimientos, por lo que avanzo mis disculpas por las omisiones.

Para empezar, quiero agradecerle a mi director de tesis, Jose María Sala, el acompañamiento a lo largo de todos estos años, y sobre todo el haberme ayudado en los momentos más duros, en los que parecía que todo el trabajo realizado no llevaba a ningún lugar. Con su ayuda pudimos darle un nuevo enfoque al trabajo realizado y avanzar en la investigación.

Quiero agradecerles también la ayuda y el acompañamiento a los compañeros del grupo de investigación Enedi: a los compañeros del Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación por los ensayos realizados, y que han sido la base para la validación de los métodos de cálculo; y en especial, al grupo de PCMs, Ana, Gonzalo y Álvaro, por todo el trabajo compartido estos años. Junto a vosotros he ido profundizando en el comportamiento de los materiales de cambio de fase, que es la base de este trabajo.

Un agradecimiento también especial a mis compañeras y compañeros de la universidad. Han sido años de varios cambios, tanto de emplazamiento como de escuela, pero en todo momento me he sentido muy bien acompañado, lo que me ha servido para afrontar la labor docente con mayor entusiasmo.

A toda la gente que conforma el movimiento de transición energética: Px1NME, Gure Energía, FrackingEz, etc. Han sido años muy intensos también en este ámbito, pero la buena compañía y la alegría y los ánimos que me habéis hecho llegar han compensado con sobra el sobreesfuerzo que requería.

A mi familia, que tanto me han acompañado. A los dos Rafas (padre e hijo), por estar siempre ahí, por interesarse por el trabajo que iba haciendo, por los avances y dificultades. A Ama, por ser una luchadora incansable, por haber sido un gran ejemplo en la vida, por animarme a continuar incansablemente. Se lo mucho que te habría ilusionado estar aquí conmigo, pero la



enfermedad pudo más que tus ganas de vivir. De todos modos, siento que me acompañas día a día, nunca te olvidaré.

Y como no, a Alfredo, mi compañero inseparable. Has sufrido todo el proceso de la tesis desde el inicio, soportando los silencios mientras mi cabeza daba vueltas pensando en nuevos enfoques para la tesis, ilusionandote conmigo con cada nueva solución y avance que conseguía. Los problemas compartidos se dividen, y las alegrías compartidas se multiplican.

*No tengo muy claro cuál es el mejor camino,  
pero intento disfrutar de la aventura de encontrarlo*

# Índice general

<b>I</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1.</b>	<b>Motivación</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>Estado del Arte</b>	<b>5</b>
2.1.	Marco legal del ahorro y eficiencia en la edificación . . . . .	6
2.2.	Almacenamiento de Energía Térmica . . . . .	8
2.2.1.	Almacenamiento de energía térmica y eficiencia . . . . .	8
2.2.2.	Almacenamiento en calor sensible . . . . .	9
2.2.3.	Almacenamiento termoquímico . . . . .	10
2.2.4.	Almacenamiento en calor latente, o cambio de fase . . . . .	11
2.3.	Materiales de Cambio de Fase o PCM . . . . .	11
2.4.	Aplicaciones . . . . .	14
2.4.1.	Almacenamiento de energía solar a baja temperatura . . . . .	16
2.4.2.	Cogeneración . . . . .	17
2.4.3.	Transporte de energía . . . . .	18
2.4.4.	Control de temperatura . . . . .	18
2.4.5.	Reducción de picos de potencia . . . . .	19
2.4.6.	Free-Cooling . . . . .	19
2.5.	Medición de propiedades de los materiales de cambio de fase . . . . .	20
2.5.1.	DSC . . . . .	20
2.5.2.	T-history . . . . .	21
2.5.3.	Otros métodos de medición . . . . .	21
2.6.	Métodos de cálculo de la transferencia de calor . . . . .	22
2.6.1.	Consideraciones iniciales . . . . .	27
2.6.2.	Métodos analíticos . . . . .	28
2.6.2.1.	Transformaciones integrales . . . . .	31
2.6.3.	Métodos de discretización . . . . .	32
2.6.3.1.	Discretización Espacial . . . . .	33
2.6.3.1.1.	Eltos Finitos y Eltos Frontera . . . . .	33
2.6.3.1.2.	Diferencias Finitas . . . . .	36
2.6.3.2.	Cambio de Fase . . . . .	37



2.6.3.2.1.	Condición de Stefan . . . . .	38
2.6.3.2.2.	Método de la entalpía . . . . .	41
2.6.3.2.3.	Calor efectivo . . . . .	43
2.6.3.2.4.	Término fuente . . . . .	46
2.6.3.3.	Discretización Temporal . . . . .	49
2.6.3.3.1.	Esquema explícito . . . . .	49
2.6.3.3.2.	Esquema implícito . . . . .	50
2.6.3.3.3.	Esquema de Crank-Nicolson . . . . .	51
2.6.3.3.4.	Esquemas a tres niveles . . . . .	52
2.6.3.3.5.	Esquemas mixtos . . . . .	55
2.6.3.4.	Esquemas de iteración . . . . .	56
2.6.3.4.1.	Gauss-Seidel . . . . .	57
2.6.3.4.2.	Newton-Raphson . . . . .	58
2.6.3.4.3.	Métodos modificados . . . . .	58
2.6.4.	Métodos indirectos . . . . .	59
2.6.4.1.	Regresión lineal . . . . .	60
2.6.4.2.	Máquina de Vectores de Soporte SVM . . . . .	61
2.6.4.3.	Algoritmos genéticos . . . . .	61
2.6.4.4.	Redes neuronales . . . . .	62
2.6.4.4.1.	Principales usos . . . . .	66
2.6.4.4.2.	Creación redes neuronales . . . . .	67
2.6.4.4.3.	Consideraciones de aprendizaje . . . . .	67
2.6.4.4.4.	Aprendizaje y Retropropagación . . . . .	68
2.6.4.4.5.	Aprendizaje: otras variantes . . . . .	74
2.7.	Aplicación de PCMs en cerramientos de edificios . . . . .	76
<b>3.</b>	<b>Objetivos y Metodología</b>	<b>81</b>
3.1.	Objetivos . . . . .	82
3.2.	Metodología . . . . .	82
<b>II</b>	<b>Análisis experimental</b>	<b>85</b>
<b>4.</b>	<b>Selección de materiales y técnica de ensayo</b>	<b>87</b>
4.1.	Selección de materiales . . . . .	88
4.2.	Fabricación de probetas . . . . .	89
4.2.1.	Termiplast . . . . .	89
4.2.2.	Energain . . . . .	89
4.3.	Técnicas de ensayo . . . . .	93

<b>5. Ensayo de DSC</b>	<b>95</b>
5.1. Termiplast . . . . .	96
5.2. Energain . . . . .	97
<b>6. Ensayo de Conductímetro</b>	<b>101</b>
6.1. Termiplast . . . . .	102
6.2. Energain . . . . .	103
<b>III Métodos de simulación</b>	<b>111</b>
<b>7. Método en Diferencias Finitas</b>	<b>113</b>
7.1. Elección del método en diferencias finitas . . . . .	114
7.2. Algoritmo explícito, método de entalpía . . . . .	115
7.3. Validación del algoritmo en diferencias finitas . . . . .	116
7.3.1. Termiplast . . . . .	116
7.3.1.1. Temperaturas interiores de la muestra . . . . .	117
7.3.1.2. Flujo de calor superficial . . . . .	118
7.3.1.3. Sensibilidad del algoritmo . . . . .	119
7.3.2. Energain . . . . .	123
7.3.2.1. Propiedades térmicas empleadas . . . . .	123
7.3.2.2. Análisis de los valores experimentales . . . . .	124
7.4. Conclusiones . . . . .	128
<b>8. Método de Redes Neuronales</b>	<b>131</b>
8.1. Desarrollo de redes neuronales . . . . .	132
8.1.1. Aplicación al ensayo en conductímetro . . . . .	133
8.2. Análisis de muro compuesto . . . . .	136
8.3. Aplicación al ensayo de Termiplast . . . . .	139
8.3.1. Resultados del entrenamiento de la red neuronal . . . . .	139
8.3.2. Análisis de sensibilidad y propagación de errores . . . . .	141
8.3.3. Conclusiones . . . . .	144
8.4. Ensayo de Energain en conductímetro . . . . .	144
8.4.1. Preparación para el entrenamiento de la red neuronal . . . . .	145
8.4.2. Red neuronal con retroalimentación: red NARX . . . . .	146
8.4.3. Red neuronal dinámica sin retroalimentación . . . . .	150
8.4.3.1. Resultados iniciales del entrenamiento . . . . .	151
8.4.3.1.1. $T^a$ constante igual a ambos lados . . . . .	152
8.4.3.2. Análisis de la sensibilidad . . . . .	158
8.4.4. Generalización de la red neuronal . . . . .	162
8.5. Conclusiones . . . . .	165



<b>9. Comparativa de Métodos</b>	<b>167</b>
9.1. Requisitos del algoritmo de cálculo . . . . .	168
9.2. Elección del método a emplear . . . . .	170
<b>IV Análisis de propiedades de PCMs</b>	<b>171</b>
<b>10. Implementación del Método Final</b>	<b>173</b>
10.1. Algoritmo de simulación de muros compuestos . . . . .	174
10.2. Método de cálculo de los nodos del cerramiento . . . . .	175
10.2.1. Nodo interior . . . . .	175
10.2.1.1. Nodo interior convencional . . . . .	175
10.2.1.2. Nodo interior PCM . . . . .	175
10.2.2. Nodos frontera . . . . .	176
10.2.2.1. Convección sobre superficie convencional . . . . .	176
10.2.2.2. Convección sobre PCM . . . . .	177
10.2.2.3. Contacto entre dos capas convencionales . . . . .	177
10.2.2.4. Contacto convencional-PCM . . . . .	178
10.2.2.5. Cámara de aire entre capas convencionales . . . . .	178
10.2.2.6. Cámara de aire con PCM . . . . .	179
10.2.3. Balance del aire interior . . . . .	179
10.2.4. Condiciones de contorno exterior . . . . .	182
10.2.5. Entrada y salida de datos . . . . .	183
<b>11. Análisis de parámetros del PCM</b>	<b>185</b>
11.1. Consideraciones iniciales . . . . .	186
11.1.1. Definición de los muros a analizar . . . . .	186
11.1.2. Propiedades a considerar en el PCM . . . . .	187
11.1.3. Parámetros de caracterización del muro . . . . .	188
11.2. Análisis de propiedades de PCM . . . . .	190
11.2.1. Diseño de experimentos . . . . .	190
11.2.1.1. Consideraciones iniciales . . . . .	190
11.2.1.2. Elección del Diseño de Experimentos . . . . .	192
11.2.2. Resultados preliminares del diseño de experimentos . . . . .	193
11.2.2.1. Energía de acondicionamiento . . . . .	193
11.2.2.2. Demanda de calefacción . . . . .	194
11.2.2.3. Demanda de refrigeración . . . . .	195
11.2.2.4. Exergía de acondicionamiento . . . . .	196
11.2.2.5. Transmitancia exergética . . . . .	196
11.2.2.6. Conclusiones iniciales . . . . .	197
11.2.3. Análisis de las superficies de respuesta . . . . .	198
11.2.3.1. PCM exterior. Energía de acondicionamiento . . . . .	199

11.2.3.1.1. Dirección de descenso . . . . .	206
11.2.3.2. PCM exterior. Demanda de calefacción . . . . .	213
11.2.3.3. PCM exterior. Demanda de refrigeración . . . . .	221
11.2.3.4. PCM exterior. Exergía de acondicionamiento . . . . .	229
11.2.3.5. PCM exterior. Transmitancia exergética . . . . .	235
11.2.3.6. PCM interior. Energía de acondicionamiento . . . . .	244
11.2.3.6.1. Dirección de descenso . . . . .	252
11.2.3.7. PCM interior. Demanda de calefacción . . . . .	256
11.2.3.8. PCM interior. Demanda de refrigeración . . . . .	267
11.2.3.9. PCM interior. Exergía de acondicionamiento . . . . .	277
11.2.3.10 PCM interior. Transmitancia exergética . . . . .	286
11.3. Conclusiones . . . . .	290
<b>12. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>295</b>
12.1. Conclusiones . . . . .	296
12.2. Propuestas de trabajo futuro . . . . .	298
<b>Bibliografía</b>	<b>299</b>
<b>A. Nomenclatura</b>	<b>317</b>
<b>B. Datos del diseño de experimentos</b>	<b>321</b>
B.1. Codificación de variables . . . . .	321
B.2. Diseño codificado . . . . .	322
B.3. Diseños de los lotes en variables reales . . . . .	323
B.4. Resultados de las simulaciones . . . . .	323



# Índice de figuras

2.1. Tipos de almacenamiento térmico . . . . .	9
2.2. Esquema de funcionamiento del almacenamiento termoquímico . . . . .	10
2.3. Principales familias de PCM . . . . .	14
2.4. Clasificación de las aplicaciones de los PCM . . . . .	15
2.5. Curva de entalpía y calor efectivo del Termiplast 23 . . . . .	20
2.6. Métodos de cálculo para Materiales de Cambio de Fase . . . . .	25
2.7. Corrientes de convección en un PCM calentado por la izquierda (Hamdan y Elwerr [78]) . . . . .	26
2.8. Variación de la entalpía con la temperatura . . . . .	28
2.9. Neurona de entradas múltiples . . . . .	63
2.10. Principales funciones de activación de neuronas . . . . .	64
2.11. Esquema de perceptrón multicapa . . . . .	64
2.12. Esquema simplificado de un perceptrón de dos capas . . . . .	69
4.1. Vista del espesor de la probeta, donde se pueden observar las capas que la forman . . . . .	90
4.2. Disposición de sondas superficiales . . . . .	90
4.3. Placas Energain de Dupont . . . . .	91
4.4. Fluxímetro y sondas de temperatura sobre una placa de Energain . . . . .	92
4.5. Conductivímetro con la muestra ensayada en su interior . . . . .	94
5.1. Resultados del DSC en las 5 muestras de Termiplast23 . . . . .	97
5.2. Curva media de Entalpía-Temperatura del Termiplast23 . . . . .	98
5.3. Curva DSC del material de cambio de fase del Energain . . . . .	99
5.4. Curva DSC de la mezcla de copolímero y material de cambio de fase del Energain . . . . .	99
6.1. Evolución de temperaturas en la superficie superior . . . . .	103
6.2. Evolución de temperaturas en el espesor de la probeta . . . . .	104
6.3. Evolución de flujos de calor en las superficies de la probeta . . . . .	104
6.4. Muestra ensayada dentro del conductivímetro . . . . .	106
6.5. Evolución de temperaturas y flujos de calor en los ensayos de Energain en el conductivímetro en el ensayo 1 . . . . .	107



6.6. Evolución de temperaturas y flujos de calor en los ensayos de Energain en el conductímetro en el ensayo 2 . . . . .	108
6.7. Evolución de temperaturas y flujos de calor en los ensayos de Energain en el conductímetro en el ensayo 3 . . . . .	109
7.1. Curva Entalpía-Temperatura media total Termiplast . . . . .	118
7.2. Comparativa de temperaturas para el nodo central . . . . .	119
7.3. Flujos de calor superficial experimentales y simulados . . . . .	120
7.4. Sensibilidad de la temperatura central con las incertidumbres de medida . . . . .	122
7.5. Sensibilidad del flujo superior con las incertidumbres de medida . . . . .	122
7.6. Sensibilidad del flujo inferior con las incertidumbres de medida . . . . .	123
7.7. Curva Entalpía-Temperatura media Energain . . . . .	125
7.8. Ensayo 1 sobre Energain . . . . .	126
7.9. Simulación del ensayo 1 de Energain. Cara fría . . . . .	126
7.10. Simulación del ensayo 1 de Energain. Cara caliente . . . . .	127
7.11. Espectro de frecuencias de temperatura del ensayo 1 de Energain. Cara caliente . . . . .	127
7.12. Resultado de la simulación mediante diferencias finitas usando los datos de temperatura suavizados del ensayo 3 . . . . .	128
8.1. Esquema de perceptrón multicapa . . . . .	133
8.2. Neurona de entradas múltiples . . . . .	133
8.3. Esquema de red neuronal dinámica . . . . .	134
8.4. Esquema de un muro compuesto, con representación de la temperaturas de mayor interés, y los flujos de calor de cada intercara . . . . .	137
8.5. Resultado de las simulaciones de la red neuronal 4-20-2 . . . . .	140
8.6. Resultado de las simulaciones de la red neuronal 8-40-2 . . . . .	141
8.7. Análisis de sensibilidad de la red neuronal 8-40-2 . . . . .	142
8.8. Análisis de sensibilidad de la red neuronal 8-40-2 modificada . . . . .	143
8.9. Reordenación de los datos experimentales . . . . .	145
8.10. Esquema de red neuronal NARX . . . . .	147
8.11. Resultado de la simulación de la red NARX . . . . .	149
8.12. Ampliación del resultado de la simulación de la red NARX . . . . .	149
8.13. Esquema de red neuronal dinámica sin retroalimentación . . . . .	150
8.14. Resultados de la simulación del ensayo 1 . . . . .	152
8.15. Resultados de la simulación del ensayo 2 . . . . .	153
8.16. Resultados de la simulación del ensayo 3 . . . . .	154
8.17. Resultados de la simulación del ensayo 1 . . . . .	155
8.18. Resultados de la simulación del ensayo 2 . . . . .	156
8.19. Resultados de la simulación del ensayo 3 . . . . .	157
8.20. Resultados del análisis de sensibilidad en la cara fría para el ensayo 1 . . . . .	159
8.21. Resultados del análisis de sensibilidad final, cara fría, ensayo 1 . . . . .	159

8.22. Resultados del análisis de sensibilidad final, cara caliente, ensayo 1 . . . . .	160
8.23. Resultados del análisis de sensibilidad final, cara fría, ensayo 2 . . . . .	160
8.24. Resultados del análisis de sensibilidad final, cara caliente, ensayo 2 . . . . .	161
8.25. Resultados del análisis de sensibilidad final, cara fría, ensayo 3 . . . . .	161
8.26. Resultados del análisis de sensibilidad final, cara caliente, ensayo 3 . . . . .	162
8.27. Resultado de la simulación de rampa de temperaturas . . . . .	163
8.28. Resultado de la simulación de rampa de temperaturas . . . . .	164
10.1. Nodo interior . . . . .	175
10.2. Convección en superficie . . . . .	176
10.3. Contacto entre dos sólidos convencionales . . . . .	177
10.4. Contacto convencional-PCM . . . . .	178
10.5. Cámara de aire entre capas convencionales . . . . .	179
10.6. Esquema del cubículo simulado . . . . .	180
10.7. Irradiación entrante en el cubículo y energía transmitida al aire . . . . .	181
10.8. Temperatura exterior y temperatura sol-aire . . . . .	184
11.1. Diseño central compuesto para tres variables . . . . .	191
11.2. Diagrama de caja para la energía de acondicionamiento . . . . .	194
11.3. Diagrama de caja para la demanda de calefacción . . . . .	195
11.4. Diagrama de caja para la demanda de refrigeración . . . . .	196
11.5. Diagrama de caja para la exergía de acondicionamiento . . . . .	197
11.6. Diagrama de caja para la transmitancia exergética . . . . .	198
11.7. Evolución de la demanda de acondicionamiento con cada variable. Lote 1 . . . . .	204
11.8. Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de acondi- cionamiento, lote 1 . . . . .	205
11.9. Demanda de acondicionamiento en función de la temperatura media de cambio de fase . . . . .	208
11.10. Diagrama de caja de la demanda de acondicionamiento, incluyendo el lote 3 . . . . .	209
11.11. Evolución demanda de acondicionamiento con cada variable. Lote 3 . . . . .	212
11.12. Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de acondi- cionamiento, lote 3 . . . . .	214
11.13. Diagrama de caja para la demanda de calefacción, incluyendo el lote 3 . . . . .	215
11.14. Evolución de la demanda de calefacción con cada variable. Lote 3 . . . . .	218
11.15. Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de calefac- ción, lote 3 . . . . .	220
11.16. Diagrama de caja para la demanda de refrigeración con el lote 3 . . . . .	222
11.17. Evolución de la demanda de refrigeración con cada variable. Lote 3 . . . . .	225
11.18. Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de refrigera- ción, lote 3 . . . . .	227

11.19	Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de refrigeración, lote 3. Continuación . . . . .	228
11.20	Diagrama de caja para la exergía de acondicionamiento, con el lote 3 . . . . .	230
11.21	Evolución de la exergía de acondicionamiento con cada variable. Lote 3 . . . . .	233
11.22	Relación entre las variables del modelo mejorado para la exergía de acondicionamiento, lote 3 . . . . .	234
11.23	Exergía de acondicionamiento en relación a la temperatura media de cambio de fase, para los lotes 1 y 3 . . . . .	236
11.24	Diagrama de caja para la transmitancia exérgica, con el lote 3 . . . . .	237
11.25	Evolución de la transmitancia exérgica con cada variable. Lote 3 . . . . .	240
11.26	Relación entre las variables del modelo mejorado para la transmitancia exérgica, lote 3 . . . . .	241
11.27	Relación entre las variables del modelo mejorado para la transmitancia exérgica, lote 3. Continuación . . . . .	242
11.28	Transmitancia exérgica en relación a la temperatura media de cambio de fase, para los lotes 1 y 3 . . . . .	243
11.29	Evolución demanda de acondicionamiento con cada variable. Lote 2 . . . . .	247
11.30	Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de acondicionamiento, lote 2 . . . . .	249
11.31	Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de acondicionamiento, lote 2. Continuación . . . . .	250
11.32	Temperatura media del interior del cubículo para el lote 2 . . . . .	250
11.33	Demanda de acondicionamiento del lote 2 en función de la temperatura media de cambio de fase . . . . .	251
11.34	Demanda de acondicionamiento del lote 2 y del aumento del lote . . . . .	254
11.35	Demanda de acondicionamiento del aumento del lote 2 en función del intervalo de temperatura . . . . .	255
11.36	Evolución de la demanda de calefacción con cada variable. Lote 2 . . . . .	259
11.37	Demanda de calefacción en función del intervalo de temperatura de cambio de fase. Lote 2 y aumento del lote . . . . .	260
11.38	Demanda de calefacción del PCM interior en función de la diferencia de temperatura entre el cambio de fase y el interior del cubículo . . . . .	261
11.39	Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de calefacción, lote 2 . . . . .	263
11.40	Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de calefacción, lote 2. Continuación . . . . .	264
11.41	Demanda de calefacción en función de la temperatura media de cambio de fase. Lote 2 y aumento del lote . . . . .	264
11.42	Demanda de calefacción en función del calor latente. Lote 2 y aumento del lote . . . . .	265
11.43	Demanda de calefacción en función del espesor. Lote 2 y aumento del lote . . . . .	266

11.44	Demanda de calefacción en función de la densidad. Lote 2 y aumento del lote	267
11.45	Evolución de la demanda de refrigeración con cada variable. Lote 2	270
11.46	Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de refrigeración, lote 2	271
11.47	Demanda de refrigeración en función de la temperatura media. Lote 2 y aumento del lote	273
11.48	Demanda de refrigeración en función del calor latente. Lote 2 y aumento del lote	274
11.49	Demanda de refrigeración en función del espesor. Lote 2 y aumento del lote	274
11.50	Demanda de refrigeración en función del espesor diferenciando valores de calor latente. Lote 2	275
11.51	Demanda de refrigeración en función del espesor diferenciando valores de la densidad. Lote 2	276
11.52	Demanda de refrigeración en función del espesor. Lote 2 y aumento del lote	276
11.53	Evolución de la demanda de refrigeración con cada variable. Lote 2	279
11.54	Relación entre las variables del modelo mejorado para la exergía de acondicionamiento, lote 2	281
11.55	Relación entre las variables del modelo mejorado para la exergía de acondicionamiento, lote 2. Continuación	282
11.56	Exergía de acondicionamiento en función del intervalo de temperatura. Lote 2 y aumento del lote	282
11.57	Exergía de acondicionamiento en función de la temperatura media de cambio de fase. Lote 2 y aumento del lote	283
11.58	Exergía de acondicionamiento en función de la diferencia de temperaturas entre la temperatura media de cambio de fase, y la temperatura media interior. Lote 2 y aumento del lote	284
11.59	Exergía de acondicionamiento en función del calor latente. Lote 2 y aumento del lote	285
11.60	Exergía de acondicionamiento en función del espesor. Lote 2 y aumento del lote	285
11.61	Exergía de acondicionamiento en función de la densidad. Lote 2 y aumento del lote	286
11.62	Evolución de la transmitancia exergética con cada variable. Lote 2	289
11.63	Relación entre las variables del modelo mejorado para la transmitancia exergética, lote 2	291
11.64	Relación entre las variables del modelo mejorado para la transmitancia exergética, lote 2. Continuación	292



# Índice de tablas

2.1. Comparativa de las propiedades de almacenamiento térmico de diferentes materiales . . . . .	12
2.2. Variables adimensionales en las distintas fases . . . . .	42
2.3. Principales funciones de activación de las neuronas . . . . .	65
4.1. Propiedades de los paneles Energain . . . . .	91
5.1. Datos de las muestras ensayadas en DSC . . . . .	96
5.2. Propiedades obtenidas del análisis DSC del Termiplast . . . . .	97
5.3. Propiedades obtenidas del análisis DSC del Energain . . . . .	98
6.1. Resultados de la determinación de conductividad . . . . .	102
6.2. Consignas ensayo 1 . . . . .	105
6.3. Consignas ensayo 2 . . . . .	105
7.1. Propiedades de Termiplast . . . . .	117
7.2. Incertidumbres en la medición de propiedades . . . . .	121
7.3. Sensibilidad del algoritmo a las distintas variables . . . . .	121
7.4. Propiedades de Energain . . . . .	124
8.1. Resultados de la simulación de estado estacionario . . . . .	156
11.1. Materiales utilizados en el muro base . . . . .	187
11.2. Valores habituales de las propiedades de materiales de cambio de fase . . . . .	188
11.3. Diseños experimentales disponibles . . . . .	193
11.4. Propiedades de la simulación 80 del Lote 1 . . . . .	199
11.5. Coeficientes de ajuste para la energía de acondicionamiento del lote 1, de primero orden . . . . .	200
11.6. Coeficientes de ajuste para la energía de acondicionamiento del lote 1, de segundo orden . . . . .	200
11.7. Coeficientes de ajuste de la demanda de acondicionamiento mejorados, lote 1 . . . . .	202
11.8. Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.8 . . . . .	203
11.9. Secuencia de datos en la dirección de descenso máximo . . . . .	206



11.10	Resultado de las simulaciones en los datos de la dirección de descenso máximo	207
11.11	Propiedades de la simulación 80 del Lote 3	208
11.12	Coeficientes de ajuste de la demanda de acondicionamiento, lote 3, primer orden	210
11.13	Coeficientes de ajuste de la demanda de acondicionamiento, lote 3, segundo orden	210
11.14	Coeficientes de ajuste de la demanda de acondicionamiento, lote 3, mejorado	211
11.15	Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.12	213
11.16	Propiedades de simulación para el Lote 3 con demanda de calefacción mínima	215
11.17	Coeficientes de ajuste de la demanda de calefacción, lote 3, primer orden	217
11.18	Coeficientes de ajuste de la demanda de calefacción, lote 3, segundo orden	217
11.19	Coeficientes de ajuste de la demanda de calefacción, lote 3, mejorado	219
11.20	Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.15	219
11.21	Coeficientes de ajuste de la demanda de refrigeración, lote 3, primer orden	223
11.22	Coeficientes de ajuste de la demanda de refrigeración, lote 3, segundo orden	223
11.23	Coeficientes de ajuste de la demanda de refrigeración, lote 3, mejorado	224
11.24	Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.18	226
11.25	Propiedades de simulación para los valores mínimos de la exergía de acondicionamiento	230
11.26	Coeficientes de ajuste de la exergía de acondicionamiento, lote 3, primer orden	232
11.27	Coeficientes de ajuste de la exergía de acondicionamiento, lote 3, segundo orden	232
11.28	Coeficientes de ajuste de la exergía de acondicionamiento, lote 3, mejorado	235
11.29	Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.22	235
11.30	Coeficientes de ajuste para la transmitancia exergética del lote 3, de primer orden	238
11.31	Coeficientes de ajuste para la transmitancia exergética del lote 3, de segundo orden	238
11.32	Coeficientes de ajuste para la transmitancia exergética del lote 3, mejorado	239
11.33	Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.26 y 11.27	242
11.34	Propiedades de simulación para los valores mínimos de la demanda de acondicionamiento	244
11.35	Coeficientes de ajuste para la energía de acondicionamiento del lote 2, de primer orden	245
11.36	Coeficientes de ajuste para la energía de acondicionamiento del lote 2, de segundo orden	245
11.37	Coeficientes de ajuste mejorados para la demanda de acondicionamiento, lote 2	246
11.38	Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.30 y 11.31	248
11.39	Secuencia de datos en la dirección de descenso máximo	253
11.40	Resultados del aumento del lote 2	254
11.41	Propiedades de simulación para los valores mínimos de la demanda de calefacción	256
11.42	Coeficientes de ajuste para la demanda de calefacción del lote 2, de primer orden	257

11.43	Coeficientes de ajuste para la demanda de calefacción del lote 2, de segundo orden . . . . .	257
11.44	Coeficientes de ajuste para la demanda de calefacción del lote 2, mejorado . . .	258
11.45	Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.39 y 11.40	262
11.46	Propiedades de simulación para los valores mínimos de la demanda de refrigeración . . . . .	267
11.47	Coeficientes de ajuste para la demanda de refrigeración del lote 2, de primer orden . . . . .	269
11.48	Coeficientes de ajuste para la demanda de refrigeración del lote 2, de segundo orden . . . . .	269
11.49	Coeficientes de ajuste para la demanda de refrigeración del lote 2 mejorado . .	272
11.50	Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.46 . . . .	272
11.51	Propiedades de simulación para el valor mínimo de la exergía de acondicionamiento . . . . .	277
11.52	Coeficientes de ajuste para la exergía de acondicionamiento del lote 2, de primer orden . . . . .	278
11.53	Coeficientes de ajuste para la exergía de acondicionamiento del lote 2, de segundo orden . . . . .	278
11.54	Coeficientes de ajuste para la exergía de acondicionamiento del lote 2, mejorado	280
11.55	Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.54 y 11.55	280
11.56	Propiedades de simulación para el valor mínimo de la transmitancia exergética .	287
11.57	Coeficientes de ajuste para la transmitancia exergética del lote 2, de primer orden	288
11.58	Coeficientes de ajuste para la transmitancia exergética del lote 2, de segundo orden . . . . .	288
11.59	Coeficientes de ajuste para la transmitancia exergética del lote 2, mejorado . . .	290
11.60	Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.63 y 11.64	290
B.1.	Diseño de Experimento codificado . . . . .	324
B.2.	Propiedades de simulación para el Lote 1 . . . . .	325
B.3.	Propiedades de simulación para el Lote 2 . . . . .	326
B.4.	Propiedades de simulación para el Lote 3 . . . . .	327
B.5.	Resultados de las simulaciones del Lote 0 . . . . .	328
B.6.	Resultados de las simulaciones del Lote 1 . . . . .	329
B.7.	Resultados de las simulaciones del Lote 2 . . . . .	330
B.8.	Resultados de las simulaciones del Lote 3 . . . . .	331



## **Parte I**

# **Introducción**



# Capítulo 1

## Motivación

Nuestra sociedad se enfrenta a una crisis profunda que va más allá de una mera crisis económica periódica, convirtiéndose en una crisis sistémica. No se trata sólo de problemas financieros, sino que se está poniendo en duda la propia viabilidad del actual sistema productivo en el que basamos nuestro bienestar. El agotamiento de los recursos materiales y energéticos, junto con la progresiva degradación de nuestro entorno, están provocando cada vez mayores desigualdades tanto a nivel global como a nivel local. Nos enfrentamos por lo tanto a una suma de crisis económica, productiva, de recursos, energética, ambiental y social, que va a requerir de la acción conjunta de todas las personas, para conseguir un cambio social a todos los niveles.

Centrándonos en el sistema energético, este se enfrenta a retos importantes que lo convierten en insostenible a largo plazo:

- El sistema energético es fuertemente dependiente de los combustibles fósiles. El 80 % del consumo de energía a nivel mundial proviene de combustibles fósiles [1]. Sin embargo, estas fuentes de energía tienen un futuro incierto, debido a que su ritmo de consumo está siendo superior al ritmo de crecimiento de las reservas.
- La quema de combustibles fósiles relacionada con el uso de energía es una de las mayores contribuciones de origen antropogénico de gases de efecto invernadero causantes del cambio climático, suponiendo más del 75 % de las emisiones de dichos gases [3].

Es necesario transitar hacia un nuevo modelo energético basado en el ahorro, la eficiencia energética, y las energías renovables, que permitan estabilizar el mercado energético a nivel mundial, al basarse en recursos que no se agotan, y que nos permitan además hacer una transición hacia una economía baja en carbono.

La Agencia Internacional de Energía, en su estudio sobre perspectivas de la energía[4], aporta algunas claves interesantes:

- El aumento del consumo de electricidad de los países emergentes puede suponer un aumento del 70 % de la demanda de energía a nivel mundial, suponiendo las energías renovables la mitad de dicho aumento.



- El aumento de la eficiencia energética puede retrasar 3 años el punto de no retorno del cambio climático<sup>1</sup>.
- El sector de vivienda de momento sólo ha desarrollado un 20 % de la capacidad de ahorro y eficiencia energética disponible<sup>2</sup>.

La gran capacidad de ahorro y eficiencia energética disponible en el sector de edificación, unido a su importante peso en el consumo energético total, lo convierte en un objetivo claro de la investigación en nuevas medidas de mejora. Las propuestas de mejora no se deberían enfocar en exclusiva en la nueva edificación, sector que ha experimentado una notable deceleración en los últimos años, sino sobre todo en medidas de rehabilitación de edificios ya construidos.

El sector de la rehabilitación eficiente de edificios es un sector económicamente emergente, que puede generar importantes beneficios económicos. Los beneficios vienen por un lado por la reactivación de un sector como el de la construcción, que ha sufrido una fuerte contracción durante la crisis, pudiéndose generar nuevos empleos, así como por el ahorro de energía que se puede obtener.

El objetivo de este trabajo es el análisis de la transferencia de calor a través de cerramientos de edificios en los que se hayan incluido materiales de cambio de fase o PCM<sup>3</sup>. La idea principal de la aplicación de materiales de cambio de fase es aumentar la inercia térmica de los edificios, pero sin provocar sobrecalentamientos, mejorando de esta forma el confort térmico. Esto permite a los edificios interaccionar mejor con los flujos energéticos del exterior, mejorando el aprovechamiento de la energía solar de manera pasiva. Los PCMs además no requieren de sistemas de integración especiales en los cerramientos, con lo que se pueden emplear también para la rehabilitación del parque de viviendas ya existente.

La inclusión de materiales de cambio de fase en cerramientos es un área de creciente interés en el sector de la edificación, que en la actualidad se enfrenta a tres grandes problemas:

- La necesidad de la mejora de las propiedades de los materiales
- El alto coste económico de los materiales
- La incertidumbre respecto a su comportamiento térmico, debido principalmente a los complicados procesos de transferencia de energía durante el cambio de fase

Este trabajo se centra en el análisis de este último punto, proponiendo nuevos métodos de experimentación, y un método de cálculo fiable, por basarse en datos experimentales, y que permita analizar a priori las propiedades y condiciones óptimas que ha de cumplir un PCM para su funcionamiento en un entorno concreto.. Se va a comenzar por lo tanto analizando los tipos de materiales empleados hoy en día, y los métodos de cálculo más habituales.

<sup>1</sup> El punto de no retorno se considera aquel en el que las emisiones totales de gases de efecto invernadero han provocado un aumento de temperatura media de 2 °C a nivel mundial. Esta condición requiere que la concentración de dichos gases en la atmósfera no supere los 450 ppm

<sup>2</sup> El sector de vivienda consume el 35.57 % de la energía a nivel mundial[5], y el 28.7 % en España[6]

<sup>3</sup> De sus siglas en inglés, Phase Change Materials

## Capítulo 2

# Estado del Arte

---

<b>2.1. Marco legal del ahorro y eficiencia en la edificación</b>	<b>6</b>
<b>2.2. Almacenamiento de Energía Térmica</b>	<b>8</b>
2.2.1. Almacenamiento de energía térmica y eficiencia	8
2.2.2. Almacenamiento en calor sensible	9
2.2.3. Almacenamiento termoquímico	10
2.2.4. Almacenamiento en calor latente, o cambio de fase	11
<b>2.3. Materiales de Cambio de Fase o PCM</b>	<b>11</b>
<b>2.4. Aplicaciones</b>	<b>14</b>
2.4.1. Almacenamiento de energía solar a baja temperatura	16
2.4.2. Cogeneración	17
2.4.3. Transporte de energía	18
2.4.4. Control de temperatura	18
2.4.5. Reducción de picos de potencia	19
2.4.6. Free-Cooling	19
<b>2.5. Medición de propiedades de los materiales de cambio de fase</b>	<b>20</b>
2.5.1. DSC	20
2.5.2. T-history	21
2.5.3. Otros métodos de medición	21
<b>2.6. Métodos de cálculo de la transferencia de calor</b>	<b>22</b>
2.6.1. Consideraciones iniciales	27
2.6.2. Métodos analíticos	28
2.6.3. Métodos de discretización	32
2.6.4. Métodos indirectos	59
<b>2.7. Aplicación de PCMs en cerramientos de edificios</b>	<b>76</b>

---



El objetivo principal de este trabajo es ahondar en el conocimiento del comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase para su inclusión en los cerramientos de edificios, partiendo de la medición de propiedades, para definir un método de cálculo para modelizar la transferencia de calor en los materiales de cambio de fase, y analizar finalmente la influencia de las variables termofísicas para un caso concreto de aplicación. El método de cálculo ha de conjugar un alto grado de exactitud, con un coste computacional mínimo, esto es, con un tiempo de cálculo de simulaciones corto que permita el análisis eficiente de diferentes propuestas de inclusión.

En el presente capítulo se va a proceder a analizar el estado actual del uso de los materiales de cambio de fase en la edificación. Partiendo del marco legal y normativo actual en materia de ahorro de energía y eficiencia en la edificación, se plantea el almacenamiento de energía como un complemento importante para mejorar el comportamiento de los edificios. Se analizan también las propuestas más habituales para la medición experimental del comportamiento de estos materiales. Posteriormente se analizan los métodos más habituales para la modelización del comportamiento térmico de los PCMs, y finalmente se analizan los principales estudios publicados hasta la fecha sobre las propiedades óptimas de los materiales de cambio de fase en los cerramientos.

## 2.1. Marco legal del ahorro y eficiencia en la edificación

El sector de edificación es uno de los grandes consumidores en la Unión Europea, suponiendo el 38.11 % del consumo final de energía en 2014, mientras que a nivel del estado supone el 29.73 % del consumo final de energía [7]. Este alto consumo ha supuesto que la Unión Europea dedique un importante esfuerzo a su reducción, dentro de sus competencias. Las directivas de la Comisión Europea se han ido transponiendo paulatinamente al derecho estatal, con lo que en la actualidad se dispone de un marco normativo, que si bien en bastantes aspectos puede parecer insuficiente, van empujando al sector de la edificación hacia mayores cotas de ahorro y eficiencia energética.

La política de la Unión Europea en materia energética se basa en el marco general que marcó la Hoja de Ruta de la Energía para 2050 [8], aprobada en 2011, que desarrolla la declaración del Consejo Europeo en el ámbito energético. En concreto, el objetivo marcado para la Unión Europea es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 80 y un 95 % por debajo de los niveles de 1990 para 2050. Este objetivo supone realizar inversiones importantes en tecnologías bajas en carbono, energías renovables, ahorro y eficiencia energética, e infraestructura de redes. Uno de los pilares de la Hoja de Ruta es por lo tanto el ahorro y la eficiencia energética. El documento analiza diferentes escenarios de actuación, y llega a la conclusión de que cualquiera de las combinaciones analizadas que cumplen con el objetivo final, es más económica que continuar con las políticas actuales, y que las energías renovables, el ahorro y la eficiencia energética, son cruciales en cualquiera de estos escenarios.

Siendo este el objetivo a largo plazo, en la actualidad está en vigor la estrategia energética

para 2020, también conocida como Estrategia 20-20-20, puesto que proponer alcanzar para el año 2020, un 20 % de aportación de energías renovables en el consumo energético europeo, un 20 % de reducción del consumo de energía, y un 20 % de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Estos objetivos son reasignados para cada estado miembro, siendo para el caso de España un 20 % de energías renovables [9], y un 10 % de reducción de gases de efecto invernadero respecto al nivel de 2005 [10]. El objetivo de reducción del consumo de energía es más complicado de definir, puesto que se basa en un objetivo relativo, pero en el caso de España se define como un ahorro adicional del 1.5 % anual entre 2014 y 2020, lo que equivale a un ahorro total de 35,227 ktep, 11,553 ktep en el sector de la edificación [11].

Teniendo en cuenta que el sector de la edificación supone en Europa el 38.11 % del consumo final de energía [7], estos objetivos de reducción de consumo tienen que pasar necesariamente por reglamentaciones específicas para este sector. La directiva principal en este ámbito es la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios [12]. Según esta directiva,

...la reducción del consumo de energía y el uso de energía procedente de fuentes renovables en el sector de la edificación constituyen una parte importante de las medidas necesarias para reducir la dependencia energética de la Unión y las emisiones de gases de efecto invernadero...

Así, esta directiva fija los requisitos de eficiencia energética de los edificios nuevos y antiguos, establece los mecanismos para la certificación energética de edificios, y marca los mecanismos para la supervisión del sistema energético.

Tal vez el aspecto de mayor relevancia de esta directiva, con vista al futuro, es la definición del Edificio de Consumo de Energía Casi Nulo o NZEB por sus iniciales en inglés<sup>1</sup>:

...edificio con un nivel de eficiencia energética muy alto, que se determinará de conformidad con el anexo I. La cantidad casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida energía procedente de fuentes renovables producida in situ o en el entorno...

A más tardar el 31 de diciembre de 2020 todos los edificios de nueva construcción han de ser de consumo de energía casi nulo, y a partir del 31 de diciembre de 2018, todos los edificios ocupados y de propiedad pública. Curiosamente, el Anexo I citado, incluye para el cómputo de la eficiencia energética del edificio exclusivamente el consumo en calefacción y refrigeración, dejando de lado el consumo de electricidad y el agua caliente sanitaria.

La normativa y los objetivos europeos han sido transpuestos a la normativa estatal principalmente mediante dos reglamentaciones principales: el Código Técnico de Edificación, y el Real Decreto 235/2013 de certificación energética de edificios.

El Código Técnico de Edificación es el documento básico que recoge las exigencias de calidad de los edificios y sus instalaciones. Se encuentra dividido en distintos documentos

<sup>1</sup>Near Zero Energy Building



básicos que recogen las exigencias de cada área: seguridad estructural, seguridad en caso de incendio, seguridad de utilización y accesibilidad, ahorro de energía, protección frente al ruido, y salubridad. El documento relativo al consumo de energía del edificio y sus instalaciones es el conocido como Documento Básico DB-HE, de Ahorro de Energía, aprobado por Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre [13].

El Documento Básico DB-HE consta de 6 exigencias mínimas que deben cumplir todos los edificios de nueva construcción, ampliación o reforma de edificios existentes y renovación de instalaciones térmicas. Así, los requisitos que deben cumplir estos edificios incluyen la limitación del consumo energético de energía primaria no proveniente de energías renovables, de la demanda energética, del rendimiento de las instalaciones térmicas, de la eficiencia de las instalaciones de iluminación, además de establecer una contribución mínima de energías renovables térmicas y eléctricas para estos edificios.

Por su parte, el Real Decreto 235/2013 por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética [14], establece la obligatoriedad de disponer de un certificado de eficiencia energética para todos los edificios de nueva construcción, también para los ocupados por autoridades públicas y para aquellos que se vendan o alquilen. La finalidad de este certificado es la promoción de la eficiencia energética, mediante una información objetiva y que permita una fácil comparación entre el grado de eficiencia energética de distintos edificios. Se entiende que los futuros compradores y usuarios preferirán un edificio de menor consumo, con lo que se fomentará la construcción de edificios de cada vez mayor eficiencia energética.

El certificado energético del edificio evalúa el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> del edificio y clasifica al edificio en una escala relativa entre las letras A y G. Así, los edificios calificados como A, serán los de mayor eficiencia energética y menos emisiones, mientras que los edificios etiquetados como G serán los de mayor consumo energético y más emisiones. El consumo medio de los edificios marca el límite entre las categorías D y E.

Como se puede apreciar, tanto a nivel europeo como estatal, existe un marco reglamentario para promover la eficiencia y el ahorro en el sector de la edificación, aunque en varios ámbitos todavía quede mucho por desarrollar, a la vista del gran potencial de ahorro que tiene este sector.

## **2.2. Almacenamiento de Energía Térmica**

### **2.2.1. Almacenamiento de energía térmica y eficiencia**

El almacenamiento de energía térmica puede ser un complemento esencial para mejorar la eficiencia energética de los edificios. Para empezar, permite almacenar durante el día la energía solar, para ser aprovechada durante la noche, como complemento a los sistemas de calefacción, en la temporada de invierno. En verano, la gran inercia térmica que aporta, evita los sobrecalentamientos, mejorando la sensación de confort.

Además, en muchas instalaciones existe un desfase entre la disponibilidad de energía térmica, y su demanda, como son las aplicaciones de cogeneración, aplicaciones de energía solar térmica para ACS, o los sistemas de aprovechamiento de calor residual. Este desfase conlleva la necesidad de almacenar esa energía generada, para poder emplearla en los momentos de demanda.

En el apartado 2.4 se describen las aplicaciones más habituales en las que se hace uso del almacenamiento de energía térmica para mejorar el comportamiento térmico de los edificios.

La importancia del almacenamiento de energía térmica para la mejora de los sistemas energéticos ha llevado por ejemplo a la Agencia Internacional de Energía a la implementación de un grupo de expertos en este área: ECES, Energy Conservation through Energy Storage<sup>2</sup>.

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica se pueden clasificar en tres grandes grupos: energía sensible, cambio de fase, y almacenamiento termoquímico, tal y como se representa en la figura 2.1.

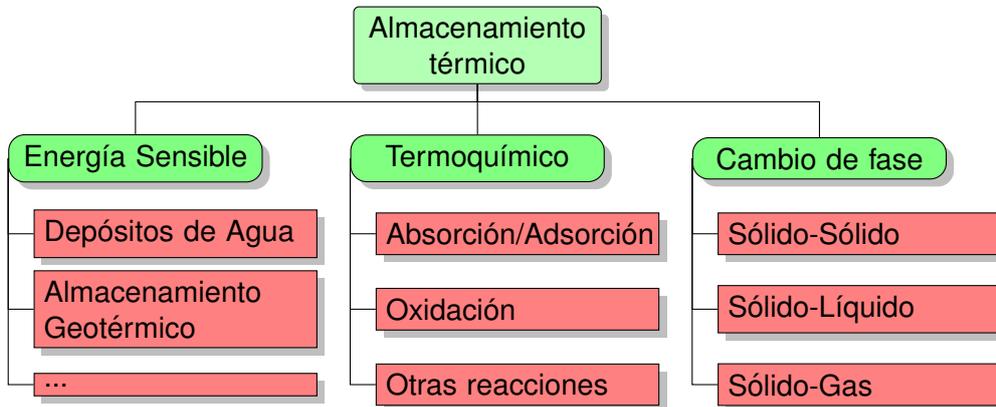


Figura 2.1: Tipos de almacenamiento térmico

### 2.2.2. Almacenamiento en calor sensible

El almacenamiento en calor sensible es el más utilizado. En este caso, se almacena la energía elevando la temperatura de un material determinado. La propiedad física que controla la cantidad de energía almacenada es el calor específico, tal y como se muestra en la ecuación 2.1. Se suele elegir por lo tanto materiales de elevado calor específico, o de elevada densidad, para mejorar la densidad energética de almacenamiento, esto es, la cantidad de energía a almacenar en un volumen dado.

$$E = V\rho c_p\Delta T \tag{2.1}$$

El material más habitual para este tipo de almacenamiento es el agua, aunque también se emplean otras sustancias, como son los materiales cerámicos, los pétreos, o el hormigón. La aplicaciones de almacenamiento geotérmico también se podrían incluir en esta categoría.

El mayor problema que presenta este método de almacenamiento de energía térmica, es

<sup>2</sup><http://www.iea-ec.es/>

que se basa precisamente en el aumento de temperatura del material de acumulación, tal y como se puede apreciar de la ecuación 2.1. Al aumentar la temperatura del sistema de acumulación térmico, aumentan también las pérdidas de calor al entorno, con lo que es necesario aumentar el nivel de aislamiento del sistema. Además, en los momentos en los que sea necesario acumular una gran cantidad de energía, se pueden dar situaciones de sobrecalentamiento del sistema, lo que en función del lugar en el que se encuentre, puede provocar situaciones de mal confort térmico. Estos sistemas suelen tener menor densidad de almacenamiento térmico, en comparación con los otros métodos aquí descritos.

Como ventaja principal del almacenamiento en calor sensible, se puede mencionar su simplicidad y el bajo coste del sistema. Además, en el caso en el que el material de almacenamiento sea líquido, como es el caso del agua, el propio material de almacenamiento se puede usar como fluido caloportador, simplificando aún más el sistema completo, al eliminar la necesidad de sistemas de intercambio intermedios.

### 2.2.3. Almacenamiento termoquímico

El almacenamiento termoquímico se basa en el aprovechamiento de los intercambios de energía que se dan en muchas reacciones reversibles, como pueden ser las reacciones de oxidación, o las de hidratación. Cuando se desee almacenar energía, se activará el sentido endotérmico de la reacción, provocando la reacción exotérmica para recuperar esa energía, tal y como se puede observar en la figura 2.2.

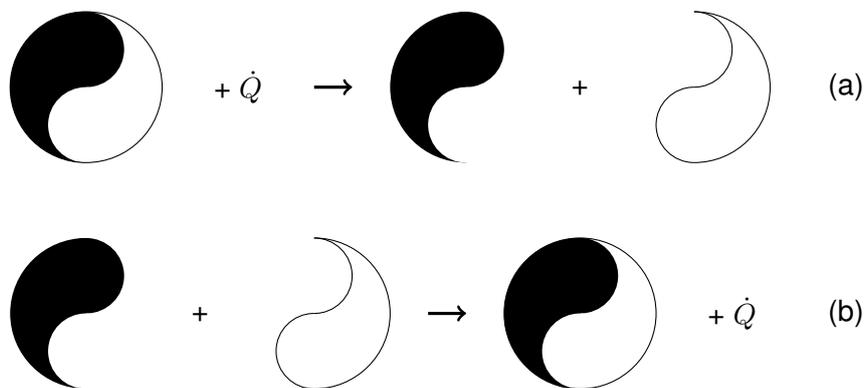


Figura 2.2: Esquema de funcionamiento del almacenamiento termoquímico

La capacidad de intercambio de energía dependerá de la reacción concreta que se esté empleando, pero por regla general presentan mayor densidad de energía que el resto de sistemas.

Como se puede observar por el esquema de funcionamiento de la figura 2.2, mientras los compuestos que participan en la reacción no están en contacto (apartado (b)), la reacción de recuperación de la energía almacenada no tiene lugar. Esto permite mantener la energía almacenada durante largos periodos de tiempo, siempre que se mantengan los reactivos separados entre sí. Como contrapartida, la naturaleza de estas sustancias ha de ser tal, que

permitan una diferenciación sencilla entre ambas, para poder separarlas de manera sencilla en tanques diferenciados. Se facilita esta tarea si uno de los componentes es gaseoso, como sucede en el caso de las reacciones de oxidación (oxígeno) o de hidratación (vapor de agua).

En la actualidad esta tecnología está en fase de desarrollo, estando disponibles a nivel comercial sólo algunos sistemas basados en hidratación de tipo absorción o adsorción. Uno de los problemas con los que se encuentran estos sistemas es que la reacción de recombinación suele requerir de una temperatura mínima determinada para activarla, que la hace incompatible con las aplicaciones a las que va destinada. Un problema adicional es la baja cinética que presentan muchas de estas reacciones, lo que impide realizar intercambios de energía con potencias elevadas, o requiere de diseños complejos para incrementar esa velocidad de reacción.

#### **2.2.4. Almacenamiento en calor latente, o cambio de fase**

En este caso, se aprovecha el intercambio de energía que se produce cuando un material cambia de fase. Este cambio de fase ocurre a una temperatura casi constante, con lo que se evitan los problemas de sobrecalentamiento. Cuenta además con mayor densidad de almacenamiento de energía que el calor sensible, lo que unido al hecho de que el proceso es prácticamente isoterma, lo hace también adecuado para la estabilización de temperaturas, y para la mejora del confort térmico.

Su mayor facilidad de aplicación a los cerramientos que los materiales termoquímicos, y su mejor confort térmico que el almacenamiento en energía sensible han sido los criterios definitivos para optar por el estudio del almacenamiento térmico en cambio de fase. En los siguientes apartados se profundizará más en el estudio de estos sistemas y de los materiales en los que se basan.

### **2.3. Materiales de Cambio de Fase o PCM**

Las sustancias se presentan en la naturaleza en diferentes fases en función de la temperatura a la que se encuentren: Sólida, Líquida y Gaseosa<sup>3</sup>. Las sustancias cambian de fase al irse calentando o enfriando, procesos que suceden a temperaturas determinadas. Durante el cambio de fase se da una transferencia de calor casi isoterma que se denomina calor latente de cambio de fase.

El cambio de fase sucede a temperatura constante en los materiales puros, y en un intervalo de temperaturas pequeño en los materiales no puros. Al disminuir la pureza del material, tiende a aumentar el intervalo en el que sucede este cambio de fase, salvo en el caso de los eutécticos, que a pesar de ser una mezcla de sustancias, cambian de fase en una temperatura única.

<sup>3</sup>Pueden existir varias fases sólidas distintas, con diferentes arreglos cristalinos y/o amorfo. Al mismo tiempo, hay sustancias que no presentan fase líquida y/o gaseosa, al degradarse antes de la transición



Como ya se ha comentado con anterioridad, el método habitual de almacenamiento de energía térmica se basa en el aprovechamiento del calor sensible o calor específico de las sustancias. Esta forma de almacenamiento e intercambio de energía se traduce en un aumento de la temperatura del material según este va absorbiendo energía.

El calor latente de cambio de fase supone un fuerte intercambio de energía con una pequeña variación de temperatura. Aprovechar este efecto permite almacenar cantidades elevadas de energía con poca cantidad de material, sin producirse sobrecalentamientos, estabilizando la temperatura del material de almacenamiento. En la tabla 2.1 se puede observar una comparativa de la capacidad de almacenamiento de varias sustancias de uso habitual.

Material	Propiedad	Valor	$\Delta T$	Masa <sup>a</sup>
Agua líquida	Sensible	4.18 kJ/kgK	20°C	3.98 kg
			40°C	1.99 kg
Hormigón	Sensible	0.88 kJ/kgK	20°C	18.92 kg
			40°C	9.46 kg
Hielo <sup>b</sup>	Latente	333 kJ/kg	...	1.00 kg
Parafina <sup>c</sup>	Latente	244 kJ/kg	...	1.36 kg
Sal Hidratada <sup>d</sup>	Latente	254 kJ/kg	...	1.31 kg

<sup>a</sup>Masa necesaria para obtener la misma cantidad de energía almacenada. Se ha tomado como referencia 1 kg de hielo

<sup>b</sup>Cambio de fase hielo-agua líquida

<sup>c</sup>Como valor de referencia se ha usado el Octadecano

<sup>d</sup>Como valor de referencia se ha usado la sal de Glauber, sulfato de sodio decahidratado

Tabla 2.1: Comparativa de las propiedades de almacenamiento térmico de diferentes materiales

Se habla de Materiales de Cambio de Fase o PCMs cuando el efecto útil que se aprovecha del material es su cambio de fase. Las posibles aplicaciones de este efecto se describen en el apartado 2.4, pudiéndose clasificar en dos grandes categorías:

- Estabilización de temperaturas
- Almacenamiento térmico

Aún así, hay que reconocer que en ocasiones no es sencillo distinguir entre ambas categorías. Como ejemplo, en la aplicación objeto de estudio, la inclusión de PCM en cerramientos de edificación se busca un doble objetivo: estabilizar la temperatura interior mejorando el confort interno, y aprovechar los flujos de calor que se dan durante el día almacenando la energía solar para su uso posterior.

Hay que añadir que el análisis de los problemas de cambio de fase no es solo útil para los materiales PCM en sí, si no que se trata de una problemática asociada a una gran cantidad de situaciones, como los procesos de forja de metales, procesos químicos de ablación durante la

reentrada de transbordadores espaciales, deposición de hielo en intercambiadores y túneles de viento, en variados problemas geológicos[15, 16], o el secado de alimentos por congelación [17]. Varios de los métodos de cálculo analizados provienen precisamente del estudio de los procesos de enfriamiento y solidificación de metales fundidos durante el procesado de los mismos, por la gran importancia que tiene la velocidad de enfriamiento en la correcta formación de la estructura de grano deseada.

Los materiales utilizados para aplicaciones de almacenamiento térmico son de naturaleza diversa. La principal condición que han de cumplir para un correcto aprovechamiento es que la temperatura de cambio de fase se ajuste lo mejor posible a la temperatura de uso. Como ya se ha indicado en la figura 2.1, existen varias posibilidades de aprovechamiento de este cambio de fase: sólido-sólido, sólido-líquido, sólido-gas. La mayoría de las aplicaciones en el sector edificación emplean el cambio de fase sólido-líquido, al permitir un buen compromiso entre la densidad de almacenamiento de energía<sup>4</sup>, y el confinamiento de la fase fluida<sup>5</sup>.

Las propiedades ideales para este tipo de materiales serían las siguientes:

- Elevado calor de cambio de fase
- Estabilidad a largo tiempo
- Compatibilidad con el contenedor
- Baja toxicidad
- Bajo coste económico

En la figura 2.3 se representan las principales familias de PCMs, clasificadas por la temperatura de cambio de fase y su calor latente<sup>6</sup>.

En el intervalo de temperaturas de interés para las aplicaciones de edificación (15-40 °C), los materiales más abundantes son las parafinas, y las sales hidratadas.

Las parafinas presentan un buen comportamiento como material de cambio de fase para el rango de temperaturas entre 0 y 100 °C debido a su calor latente elevado, bajo peso, gran rango de temperaturas de fusión existentes, no corrosivas, no tóxicas, inertes y estables químicamente, baja presión de vapor, baja variación de volumen y subenfriamiento despreciable [19, 20]. Su mayor problema de cara a la aplicación en edificación es su alta inflamabilidad.

Por su parte, las sales hidratadas poseen un mayor calor latente y una mejor conductividad, y no son inflamables. Como contrapartida, presentan fusión incongruente, son menos estables, y pueden provocar problemas de corrosión en sus contenedores[20].

<sup>4</sup>El cambio de fase sólido-sólido tiene menor calor latente

<sup>5</sup>La fase líquida es más fácil de contener que la fase gaseosa

<sup>6</sup>Se han unificado en este diagrama los datos de la recopilación hecha por Zalba [18] junto con un diagrama del Zae Bayern

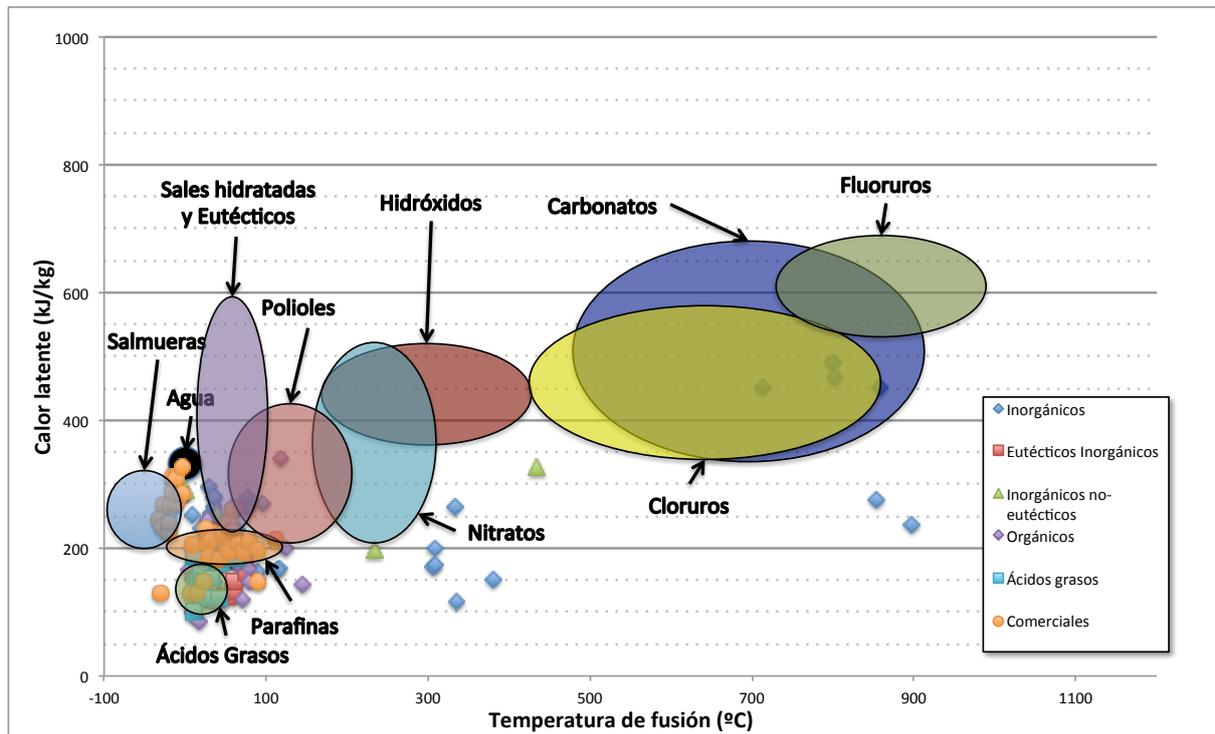


Figura 2.3: Principales familias de PCM

## 2.4. Aplicaciones

Los materiales de cambio de fase cuentan con la doble ventaja de poseer una gran densidad de almacenamiento de energía, y de que el proceso de absorción y cesión de calor sucede a temperaturas prácticamente constantes. Esto los hace idóneos tanto como materiales de almacenamiento térmico, como para su uso en estabilización de temperaturas. Los PCMs se han aplicado en ambas vertientes, tal y como se muestra en la figura 2.4.

- Estabilización de temperaturas: La gran capacidad de intercambiar energía durante el cambio de fase, sin variar apenas su temperatura, los hace idóneos para mantener la temperatura de diferentes sistemas y aplicaciones:
  - Mantenimiento de la cadena de frío/calor: normalmente se basa en los conocidos bloques rellenos de salmueras que se usan en las neveras portátiles. Resulta de gran utilidad para aplicaciones médicas, durante el traslado de medicamentos sensibles y tejidos orgánicos. También se han desarrollado sistemas similares para el transporte de comida u otros elementos a temperaturas elevadas [21, 22, 23].
  - Mejora del confort interior de recintos: Los cerramientos interiores de los edificios disponen de una gran superficie de intercambio de calor. Disponiendo materiales de cambio de fase en el interior de dichos cerramientos se puede estabilizar la temperatura del interior, mejorando notablemente el confort térmico [24].

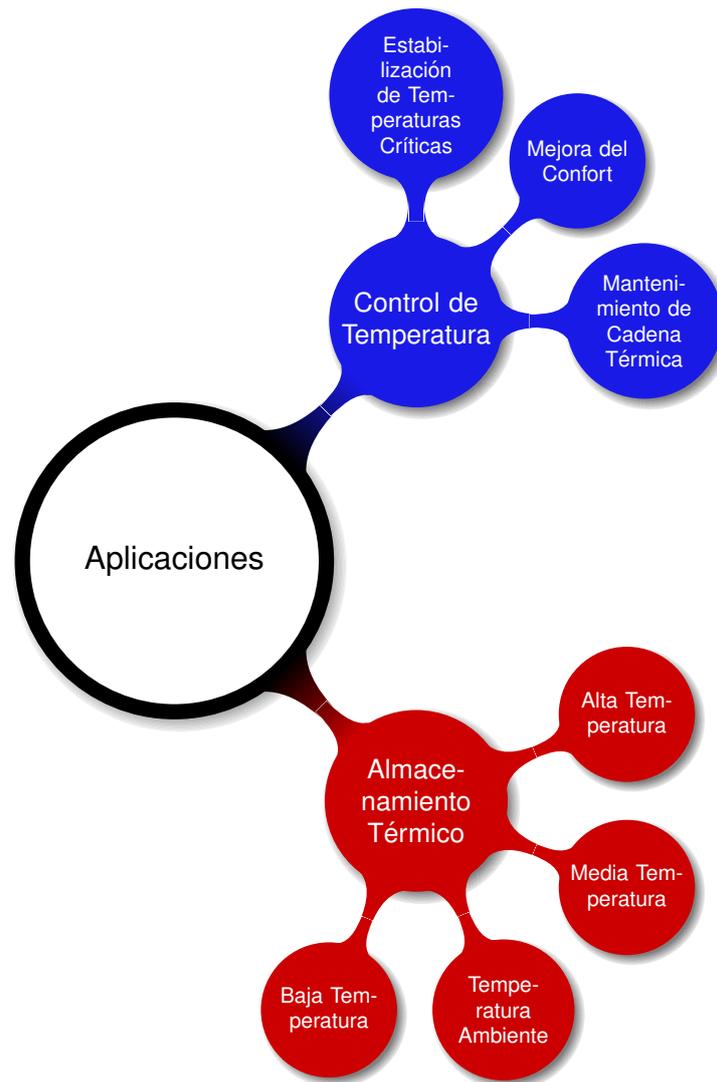


Figura 2.4: Clasificación de las aplicaciones de los PCM



- Estabilización de temperaturas: existen bastantes dispositivos y procesos industriales optimizados para funcionar a una temperatura determinada, y cuyo rendimiento varía sensiblemente al cambiar dicha temperatura, o sufre una degradación importante. El empleo de un material de cambio de fase a esa temperatura, puede estabilizar la temperatura del proceso, mejorando el rendimiento [25].
- Almacenamiento térmico: Existen varias posibilidades de clasificación de los sistemas de almacenamiento térmico. Si se clasifican por su temperatura de uso:
  - Almacenamiento a baja temperatura: por debajo de la temperatura ambiente. Se utiliza en aplicaciones de acondicionamiento de interiores, por almacenamiento de frío. Normalmente se emplean salmueras o hielo directamente, aunque también se pueden usar otros materiales, como parafinas [26].
  - Almacenamiento a temperatura ambiente: En temperaturas cercanas al ambiente, se suelen emplear los PCMs como sistemas de almacenamiento de energía solar a baja temperatura. En este caso lo más habitual es usar PCMs en los cerramientos de edificios, aportando además confort térmico tal y como se ha comentado con anterioridad. En este rango de temperaturas también podemos encontrar aplicaciones de Free-Cooling [27, 28].
  - Almacenamiento a media temperatura: se trata del rango de temperaturas entre la temperatura ambiente y unos 120°C, esto es, el mismo rango de uso de los tanques de agua. En este rango las aplicaciones más habituales están relacionadas con el almacenamiento de energía solar para calefacción y ACS<sup>7</sup>, o con sistemas de cogeneración y microcogeneración de uso doméstico [29, 30].
  - Almacenamiento a alta temperatura: Por encima de 120°C, se trata sobre todo de aplicaciones industriales, ligadas a la cogeneración, al aprovechamiento y transporte de calores residuales, y a la generación solar termoléctrica [31, 32].

Se va a pasar a continuación a describir con mayor detalle algunas de las aplicaciones y sistemas de mayor interés. El análisis de la inclusión de PCMs en los cerramientos se va a realizar en el apartado 2.7.

#### **2.4.1. Almacenamiento de energía solar a baja temperatura**

Cada vez está más extendido el uso de energía solar para el calentamiento de ACS y calefacción. El actual Código Técnico de Edificación[33], obliga a la instalación de colectores solares térmicos para cubrir como mínimo un 30 % del consumo de ACS de las viviendas. También se empieza a aplicar para cubrir parte de las necesidades de calefacción, compaginándolo incluso con el frío solar por absorción para aprovechar los excedentes de energía que se dan en verano.

---

<sup>7</sup>Agua Caliente Sanitaria

El empleo de los PCMs para la energía solar se da sobre todo en dos equipos de la instalación:

- Colectores solares con inclusión de PCM. El objetivo de incluir el PCM en los propios colectores es doble. Por un lado, reducir la temperatura de los mismos, evitando sobrecalentamientos que aumentan las pérdidas de energía al ambiente. Por otro, extender su rango de utilización al dotarles de mayor inercia térmica, permitiéndoles seguir calentando agua en momentos de paso de nubes, o a última hora de la tarde. En el PROMES se ha trabajado activamente en el desarrollo de PCMs para la construcción de colectores solares planos [34, 35], aunque también se ha probado la inclusión de estos materiales en otras tipologías de colector [36].
- Tanque solar con PCM: el objetivo principal de sustituir parcial o totalmente el agua en un tanque solar mediante PCM es reducir el volumen del mismo. La mayor densidad de almacenamiento térmico del PCM permite el uso de depósitos de acumulación de menor tamaño con prestaciones similares, lo que puede ser una ventaja importante en lugares con espacio limitado. Además tal y como demostraron Cabeza et al, la inclusión de PCMs estabiliza la temperatura de salida durante más tiempo[37].

Mención aparte merece el uso de PCMs en cocinas solares[38, 39]. La inclusión de materiales de almacenamiento térmico permite cocinar en momentos en que no haya sol, además de permitir separar la zona de cocción de la zona de captación solar, permitiendo realizar la cocción de alimentos en el interior de las viviendas.

#### 2.4.2. Cogeneración

El uso de sistemas de almacenamiento de energía junto con los equipos de cogeneración, permite desacoplar la generación de electricidad, de la demanda térmica. De esta forma, el equipo puede estar trabajando a rendimiento máximo, y almacenando calor para su posterior consumo. El uso de almacenamiento térmico puede suponer por lo tanto un ahorro importante tanto desde el punto de vista de energía, como de inversión. Como ejemplo, un estudio del empleo de cogeneración para calefacción de distrito demostró un ahorro de energía del 12 %, y un ahorro económico del 5 %[40].

El uso de materiales de cambio de fase para el almacenamiento térmico, permite reducir el volumen de almacenamiento, evitando sobrecalentamientos, y manteniendo la temperatura constante[41]. Al desacoplar la generación de electricidad y la demanda térmica, se puede ajustar también la generación de electricidad al perfil de consumo, extendiendo así el uso de la cogeneración eficiente a sistemas aislados de la red eléctrica.

Los PCMs suponen una ventaja adicional en el caso del uso de sistemas de micro-cogeneración para el sector residencial. El volumen disponible en las viviendas actuales empieza a ser un factor crítico, y la superficie disponible para cada nuevo equipamiento puede ser un elemento de decisión primordial entre tecnologías. El uso de materiales de cambio de fase reduce



notablemente el volumen necesario para el almacenamiento de energía de un sistema de micro-cogeneración, ofreciendo una ventaja competitiva frente a otras tecnologías [42].

### 2.4.3. Transporte de energía

La mayor densidad de almacenamiento de energía que se obtiene con los materiales de cambio de fase, los hace también adecuados para el transporte de energía. La masa a emplear por unidad de energía transportada es sensiblemente menor, con lo que se reducen los costes de transporte.

Se han propuesto sistemas de aprovechamiento de calores residuales en industria, para su distribución en zonas alejadas. Por ejemplo, Nomura et al [43] desarrollaron un sistema de almacenamiento con Eritritol e intercambiador incluido en el propio sistema.

El sistema TransHeat propone el empleo de grandes tanques de almacenamiento con Materiales de Cambio de Fase con temperaturas en el rango de 56°C a 180°C y una capacidad de 3.5 MWh[44].

Una perspectiva distinta es el empleo de slurries: suspensiones o emulsiones de materiales de cambio de fase en el fluido de intercambio térmico [45]. La mayor capacidad de almacenamiento térmico de los PCMs reduce de manera significativa la cantidad de fluido a emplear, disminuyendo también el sobrecalentamiento, y las pérdidas de calor al entorno. Además, se mejora la transferencia de calor con el PCM, al tratarse de un intercambio convectivo. Se ha propuesto su uso en distintos sistemas, como en sistemas solares domésticos [45], o para sistemas de refrigeración [46].

### 2.4.4. Control de temperatura

El elevado calor latente de los PCMs, junto con el intercambio de calor casi isoterma durante el cambio de fase, los hace adecuados para el control de temperatura de diversos procesos. Disponiendo la cantidad suficiente de un material con temperatura de cambio de fase similar a la temperatura de control, se estabiliza la temperatura notablemente mejor que sistemas convencionales, y en la mayoría de situaciones, sin ningún consumo adicional de energía.

Qu et al [47] han desarrollado un disipador para circuitos electrónicos basado en una matriz porosa de cobre rellena de parafina, y con una superficie aleteada en su lado superior. Demostraron que con esta disposición, se consigue una menor temperatura en el circuito, que usando un disipador convencional que sólo cuente con aletas. Fiedler et al [48] analizaron también disipadores con diferentes configuraciones de aletas y espumas metálicas con parafina, obteniendo la configuración de espuma y parafina los mejores resultados.

En la situación actual cobra cada vez mayor interés el uso de baterías de gran potencia, en vehículos eléctricos. El control de temperatura de estas baterías es crucial para el correcto funcionamiento de las mismas, y para alargar su vida útil. Duan y Naterer [49] han analizado la posibilidad de emplear PCMs para controlar su temperatura, demostrando que pueden ser una buena alternativa.

Otra línea de investigación analiza la influencia de añadir un PCM a los paneles fotovoltaicos. La temperatura del panel influye en el rendimiento del mismo, disminuyendo el rendimiento al aumentar la temperatura. Huang [50] propone emplear dos PCMs diferentes, con la inclusión de aletas metálicas, obteniendo mejoras de generación de electricidad superiores al 25 %.

El campo de la alimentación es otro campo de interés para este tipo de aplicaciones, bien para mantener temperaturas adecuadas durante el transporte [51], como para asegurar temperaturas ante posibles fallos de equipos [22, 52].

#### 2.4.5. Reducción de picos de potencia

Un buen sistema de almacenamiento térmico, unido a una correcta estrategia de control, podrían permitir usar equipos de acondicionamiento de menor potencia, reduciendo los picos de potencia. De esta forma se obtendría un doble beneficio: menor coste de inversión, y menor sobrecarga de la red eléctrica. Bejan ya propuso en 1978 el uso de almacenamiento térmico con calor sensible [53] para reducir los picos de potencia.

La idea es sencilla: durante los periodos de baja demanda de acondicionamiento, se deriva la potencia sobrante hacia el sistema de almacenamiento térmico, de forma que cuando crezca la demanda, se pueda extraer energía del sistema de almacenamiento para cubrir el pico de demanda.

Las mejores propiedades de los materiales de cambio de fase, con mayor densidad de almacenamiento, y sin sobrecalentamientos, presentan grandes cualidades para su uso en este tipo de aplicaciones. Qureshi et al [54] analizaron el comportamiento de un edificio completo con inclusión de PCMs, obteniendo porcentajes de conservación de energía de incluso el 100 %, aunque para el total del periodo analizado era 31.30 %.

#### 2.4.6. Free-Cooling

El Free-Cooling aprovecha los cambios de temperatura del exterior a lo largo del día para conseguir un sistema de acondicionamiento interior gratuito. Se almacena el calor del día para calefactar el interior durante la noche y/o el frío de la noche para refrigerar el interior durante el día. Waqas et al [28] han realizado una interesante revisión de los trabajos disponibles en este área.

Zalba et al han estudiado ampliamente este sistema [55, 27, 56, 57, 58], tanto desde el punto de vista de la implementación del mismo, hasta el análisis de las condiciones limitantes, los procesos de transferencia de calor que tienen lugar, y sus criterios de diseño.

Raj y Velraj [59] han hecho una extensa revisión de los trabajos publicados sobre free-cooling llegando a la conclusión de que el factor determinante es el clima, siendo rentable el free-cooling en zonas con gran amplitud térmica en el ciclo día/noche, y con un PCM cuya temperatura coincida con la media de la variación térmica.



## 2.5. Medición de propiedades de los materiales de cambio de fase

A la hora de plantear el uso de materiales de cambio de fase, es imprescindible adecuar las propiedades del material a las condiciones de utilización. Para ello, es necesario medir las propiedades de los materiales, y más en concreto, las propiedades relativas al cambio de fase: intervalo de temperaturas de la transición y calor latente.

### 2.5.1. DSC

El método más habitual para la medición de estas propiedades es la calorimetría diferencial de barrido o DSC<sup>8</sup> se basa en medir la diferencia de absorción o cesión de calor entre una muestra y una referencia, en función de la variación de temperatura. Al medir la absorción de calor en función de la temperatura, es posible evaluar tanto el calor específico fuera de la zona de cambio de fase, y el calor latente como suma del calor total intercambiado durante el cambio de fase, sin más que calcular la derivada del calor intercambiado en función de la temperatura. De esta forma, se pueden obtener figuras como 2.5. En esta figura se representa

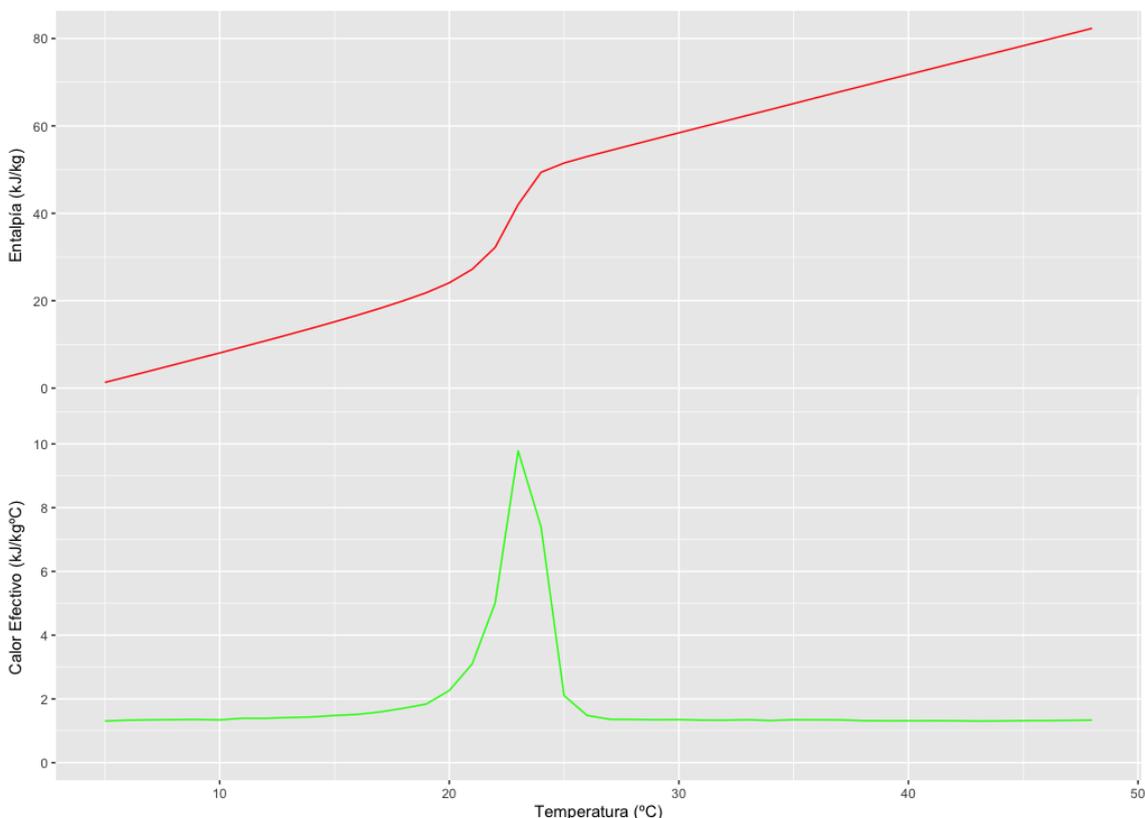


Figura 2.5: Curva de entalpía y calor efectivo del Termiplast 23

la evolución de la entalpía y del calor específico efectivo en función de la temperatura para el

<sup>8</sup>De sus siglas en inglés, Differential Scanning Calorimetry

material Termiplast 23, obtenidos a través de un ensayo de DSC.

El análisis de las curvas obtenidas permite distinguir las zonas de transición, en las que el calor efectivo es constante, o la evolución de la temperatura lineal y menor pendiente, de las zonas de transición de fase, en las que el calor efectivo varía de forma rápida, y la pendiente de la entalpía aumenta de forma visible. Esto permite definir las temperaturas de inicio y final del cambio de fase, para conocer el intervalo de temperatura y la temperatura media de cambio de fase, y por diferencia de entalpías o integración del calor efectivo, el calor latente de cambio de fase.

Esta técnica se ha empleado ampliamente para la definición de las propiedades de nuevos materiales de cambio de fase ([60],[61],[62]), o analizar la estabilidad en el tiempo de las propiedades de los materiales ([63],[64],[65]).

### 2.5.2. T-history

Un método alternativo para la medición del calor latente y las temperaturas de cambio de fase de los PCMs, es el conocido como método T-history. El método DSC tiene varios inconvenientes que en algunas ocasiones pueden ser importantes [66]:

- El pequeño tamaño de muestra, (1-10 mg), provoca que algunos comportamientos como el subenfriamiento no se repliquen de igual manera que con cantidades mayores de PCM
- Los equipos necesarios para realizar este ensayo son complicados y caros
- No permiten la medición de varias muestras de manera conjunta

Por estos motivos, Zhang y Jiang desarrollan en 1999 el método T-history [66]. En este método, se somete a una muestra de PCM situada en el interior de un tubo de ensayo, a un cambio de temperatura repentino que provoque el cambio de fase. En paralelo, se somete a una muestra de referencia, normalmente agua destilada, al mismo cambio de temperaturas. Comparando la evolución de temperatura interna del PCM y de la muestra de referencia, se puede obtener la curva de entalpía-temperatura del material de cambio de fase. Este método permite comparar al mismo tiempo varias probetas con diferentes materiales de cambio de fase, en un único ensayo simultáneo.

Este método ha sido posteriormente mejorado para aumentar su replicabilidad, rango de temperaturas de uso y exactitud, por Hong et al [67] y [68], Peck et al [69] y Lázaro et al [70].

### 2.5.3. Otros métodos de medición

Además de la caracterización del cambio de fase, otras aproximaciones de la caracterización del comportamiento de los PCMs se basan en la medición directa de los flujos de calor al variar las temperaturas del material. En una revisión bibliográfica de las técnicas de ensayo similares, se han identificado dos métodos diferentes:



- Ensayos en depósitos fabricados ad-hoc, de tamaño medio, con inserción de sondas en distintos puntos: Estos se realizan sobre todo para la simulación de depósitos de almacenamiento térmico, con una geometría cilíndrica, y una dirección de flujo de calor principal radial, como los trabajos realizados por Agyenim et al [71], Wu y Zhao [72], o Nomura et al [43]
- Ensayos en paredes de tamaño real, mediante células Paslink, o en habitáculos experimentales: En este caso la mayor problemática viene de la inclusión de muros compuestos sobre los que se aplica el material de cambio de fase, y que pueden interferir en los flujos de calor y/o variaciones de temperatura. Este método ha sido empleado por autores como Evers et al [73] o Diarce et al [74]

## 2.6. Métodos de cálculo de la transferencia de calor

El cálculo de la transferencia de calor en materiales de cambio de fase es bastante complejo. Es necesario resolver la ecuación de difusión del calor (ecuación 2.2), una ecuación en derivadas parciales de segundo grado, en donde además los coeficientes de la ecuación son dependientes de la variable Temperatura, y la relación entre las dos variables, Temperatura y Entalpía, es fuertemente no lineal durante el cambio de fase.

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla (k \nabla T) \quad (2.2)$$

Esta ecuación además se tiene que resolver de forma conjunta a la ecuación de Fourier 2.3, para obtener los flujos de calor:

$$q = -k \nabla T \quad (2.3)$$

A pesar de la aparente simplicidad en la representación de estas ecuaciones, su resolución analítica sólo es posible en casos relativamente sencillos, como los casos de geometrías monodimensionales y propiedades de los materiales constantes, cuando la relación entre entalpía y temperatura es lineal.

Se han desarrollado diferentes métodos para poder calcular la transferencia de calor durante el cambio de fase. Una posible clasificación de estos métodos se basa en el método de resolución aplicable. Murray y Landis [75] propusieron una clasificación en tres grupos:

- Solución analítica: Disponible sólo para geometrías y condiciones de contorno especiales, con geometrías y condiciones simétricas o casos de cuerpos semiinfinitos. Cabe aquí destacar la solución exacta del cuerpo semiinfinito que solidifica a temperatura constante de la superficie libre, solución debida a Neumann [76] y comentada más adelante, en el apartado 2.6.2.
- Métodos de diferencias completos: Basados en la discretización del espacio y del tiempo.

- Métodos de parámetros de conjunto: En este caso se agrupa el espacio en grandes regiones (por ejemplo, todo el sólido como única región), asignándole a la región unas propiedades medias, y una temperatura uniforme en todo el área, mientras que el tiempo se mantiene como variable continua.

Kroeger y Ostrach [15] clasifican los métodos de cálculo en función de las subdivisiones espaciales a realizar:

- Región única: se aplica una única ecuación al conjunto de fases que conforman el problema. Esta metodología se puede identificar con los problemas de red espacial fija explicados con posterioridad.
- Múltiples regiones: se aplican diferentes ecuaciones a cada una de las fases que conforman el problema, junto con las necesarias condiciones de continuidad en las interfases. Esta metodología se puede identificar con los problemas de red espacial variable o de frontera móvil, explicados con posterioridad.

Una última forma de clasificar estos métodos es en función de las leyes termodinámicas y/o físicas en las que se basan:

- Métodos de micro-escala: se basan en el análisis de las interacciones interatómicas e intermoleculares, agrupados mayoritariamente dentro de los métodos de dinámica molecular. El pequeño tamaño de escala a la que se realiza el análisis dificulta la aplicación de estos métodos a aplicaciones de escala real. Resultan sin embargo de gran utilidad para explicar ciertos fenómenos que ocurren en los PCMs, como puede ser la segregación de las sales hidratadas, o el confinamiento dentro de matrices porosas, así como para estudiar la formación de microestructuras de gran importancia a nivel macroscópico [77]. Mediante diversos métodos de reducción de variables se puede escalar en cierta medida este método para aplicarlo a sistemas de tamaño significativo.
- Métodos de 1<sup>er</sup> Principio de la Termodinámica: se basan en la conservación de la energía dentro del PCM, bajo diversas condiciones de frontera. Se utilizan para calcular el campo de temperaturas, los flujos de calor, cantidad de energía almacenada/recuperada, etc. Dentro de esta categoría podemos distinguir dos grandes familias de métodos: los métodos de frontera móvil, y los métodos de red espacial fija.
- Métodos de 2<sup>o</sup> Principio de la Termodinámica: se utilizan sobre todo para optimizar una solución concreta, de forma que se puedan definir las propiedades y disposición de los materiales que permitan un óptimo aprovechamiento del cambio de fase, sobre todo en lo que hace referencia a las temperaturas de cambio de fase. El uso del análisis exergético es de gran utilidad para una perfecta comprensión del comportamiento de los sistemas de almacenamiento térmico. Al contemplar la pérdida de disponibilidad y temperatura del sistema de almacenamiento refleja de mejor manera el valor termodinámico y económico de la operación del mismo [53].

Los métodos de micro-escala suponen un excesivo detalle para la aplicación objeto de estudio. Emplear este método para la simulación de muros completos supone un nivel de detalle que provoca un fuerte aumento del coste computacional. Por su parte el empleo de los métodos basados en el 2º principio, si bien de utilidad en la optimización de las aplicaciones, no es útil para evaluar la transferencia de calor a través de los cerramientos. Sin embargo, se empleará la exergía en el análisis final de propiedades de los materiales de cambio de fase.

Por este motivo se va a proceder a continuación a profundizar en el estudio de los métodos basados en el 1<sup>er</sup> principio de la termodinámica. En el presente trabajo se ha decidido clasificar los métodos de la siguiente forma, que se representa también en la figura 2.6:

- Métodos analíticos. Estos métodos se basan en la resolución exacta de la ecuación de la difusión del calor. Teniendo en cuenta la complejidad de la ecuación, sólo se puede resolver para casos muy concretos y simplificados, como se expone en el apartado 2.6.2
- Métodos de discretización. Estos métodos se basan en aproximar la ecuación en derivadas parciales, por otra en diferencias mediante la subdivisión del problema en pequeños elementos espaciales y temporales enlazados entre sí, como se expone en el apartado 2.6.3. Las tres variantes más habituales son las siguientes:
  - Elementos finitos
  - Métodos de elementos de frontera
  - Diferencias finitas
- Métodos indirectos. Estos métodos se basan en encontrar ecuaciones o sistemas de ecuaciones que describan la relación entre las variables dependientes e independientes del problema, pero sin recurrir a la descripción del mismo. Se trata de métodos que tratan al sistema como si de una caja negra se tratara, relacionando las entradas (variables independientes) con las salidas (variables dependientes). Estos métodos se describen en el apartado 2.6.4. Los métodos más habituales para el análisis del cambio de fase son:
  - Algoritmos genéticos
  - Redes neuronales

Además de la dificultad que supone la resolución de la ecuación de difusión del calor para el caso del cambio de fase, debido a la fuerte no-linealidad que supone dicha transformación de estado, en muchos casos se añade la aparición de movimiento en la fase líquida.

La variación de la densidad con la temperatura, hace que aparezcan fuerzas ascendentes de empuje en el estado líquido, generándose un flujo de materia que haga que el mecanismo de transferencia de calor en el estado líquido pase de ser la conducción a ser la convección. En este caso, es necesario acoplar la ecuación de conservación de la energía, con las ecuaciones de movimiento, como son la ecuación de conservación del momento, o las ecuaciones de



Figura 2.6: Métodos de cálculo para Materiales de Cambio de Fase

Navier-Stokes, además de la ecuación de transferencia de masa entre las dos fases. En la figura 2.7 se encuentran representadas las corrientes de convección en un recipiente con PCM calentado por el lado izquierdo [78].

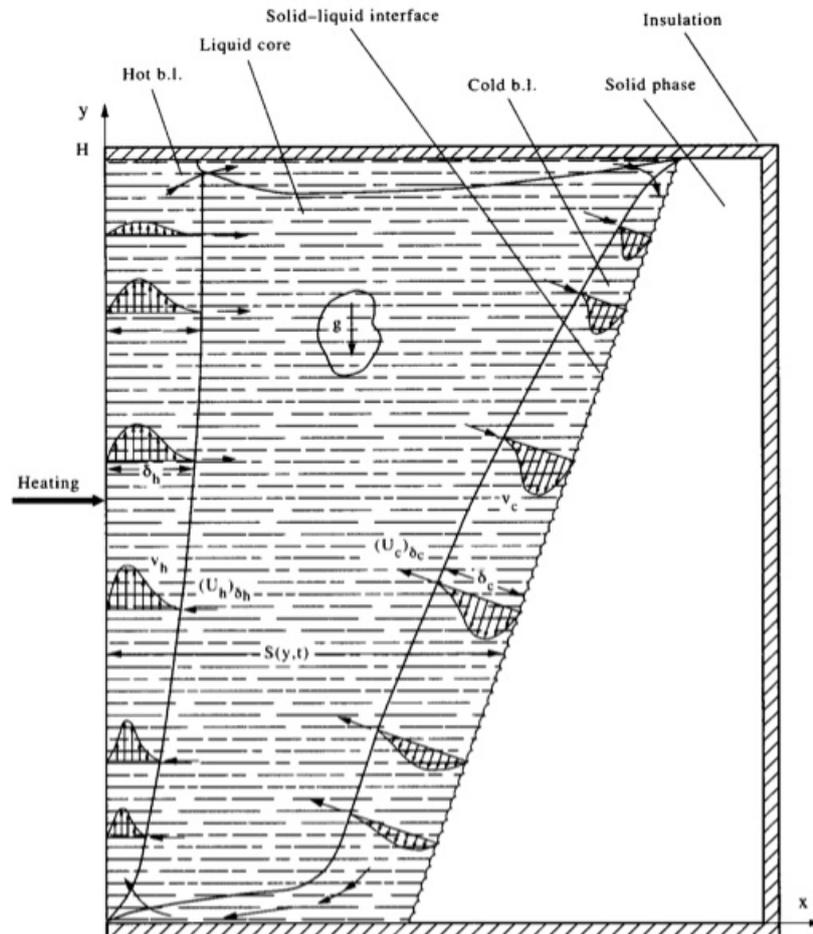


Figura 2.7: Corrientes de convección en un PCM calentado por la izquierda (Hamdan y Elwerr [78])

Las corrientes convectivas en la fase líquida de los PCM suelen facilitar la transferencia de calor, aumentando la potencia de los sistemas de almacenamiento, con un efecto por lo tanto positivo en este tipo de sistemas. Este aumento de la velocidad de transferencia de calor supone una variación de la forma de la interfase, que se mueve a mayor velocidad donde la corriente convectiva es más fuerte, obteniéndose configuraciones inclinadas de estas fronteras [79].

La complejidad se acrecienta aún más si cabe, cuando el PCM no está formado por un material puro que cambie de estado en una única temperatura, sino que presente un rango de temperaturas de cambio de fase. En este caso, se genera una región de mezcla de las fases sólida y líquida, con propiedades intermedias que dificultan en gran medida la aplicación de este método. En esta región de mezcla puede darse de manera simultánea el proceso de cambio de fase y la circulación de parte de la fase líquida a través de la intercara dentrítica que

se forma. Este flujo puede ser descrito como un flujo convectivo a través de un medio poroso.

La magnitud de la convección natural es proporcional a la extensión del área fundida, aumentando con el tiempo en los procesos de fusión, y disminuyendo durante la solidificación [80]. En muchas ocasiones sin embargo, se aplican medidas para minimizar las corrientes de convección.

Una forma de soslayar la complejidad añadida que supone la existencia de convección natural, es sustituir el efecto de la convección por una conductividad efectiva mayor a la real de la fase líquida. Este método ha sido empleado por varios autores, como Murray y Landis [75], Carslaw y Jaeger [76], o más recientemente Costa et al. [81] o Zukowski [82]. El cálculo de esa conductividad se realiza a través de la siguiente expresión:

$$k_{eff} = k_l Nu \quad (2.4)$$

Además de la variación de la densidad con la temperatura en la fase líquida, habitualmente se da una diferencia de la densidad entre los estados sólido y líquido. Esto provoca en los procesos de solidificación la formación de geometrías complejas en la fase sólida, que en el caso de que suponga una reducción de volumen, puede causar huecos que debiliten la resistencia mecánica de la misma. Este proceso ya fue estudiado Shamsundar y Sparrow [83], y resulta de vital importancia en el análisis de solidificación de metales y aleaciones.

### 2.6.1. Consideraciones iniciales sobre los métodos de cálculo a emplear

Los métodos de cálculo desarrollados a lo largo de la historia son múltiples, y van desde los métodos aplicables a las condiciones más generales, hasta los métodos para resolver los problemas más específicos. Ante la gran variedad de métodos existentes, y aunque se ha procurado dar una visión lo más amplia posible en los siguientes apartados, es importante recordar previamente algunas consideraciones iniciales que se han tomado a la hora de desarrollar el presente trabajo.

El objetivo del presente trabajo es la propuesta de un nuevo método de cálculo para el análisis del comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase en la edificación. Esto supone una serie de condicionantes previos a la hora de desarrollar el método de cálculo:

- Simplicidad geométrica: Los cerramientos de los edificios son normalmente elementos geoméricamente sencillos, de forma y simetría planas. Esto facilita enormemente el cálculo de los flujos de calor y la evolución de temperaturas, al no requerir de complejas transformaciones espaciales para acoplar el problema a la geometría del sistema.
- Flujo de calor unidimensional: Junto con la simplicidad geométrica, una ventaja adicional es que el flujo de calor a través de los cerramientos se considera normalmente como unidimensional, lo que simplifica la ecuación de difusión de calor, ecuación 2.2, haciéndola únicamente dependiente del tiempo y una coordenada espacial.

- Ausencia de convección en la fase líquida: Los PCM van a estar confinados dentro de los propios cerramientos, en principio como materiales microencapsulados, o estabilizados en la fase sólida. Esto supone que no va a haber movimiento apreciable cuando el material esté en fase líquida, y por lo tanto no será necesario considerar la convección de la fase líquida.
- El objetivo principal del método a desarrollar es analizar la evolución de la temperatura y los flujos de calor a través del cerramiento, y no analizar otros aspectos como la posición de la interfase, o la creación de microestructuras durante el cambio de fase.

## 2.6.2. Métodos analíticos

La simulación del comportamiento térmico de PCMs mediante métodos analíticos se basa en la resolución de las ecuaciones de la difusión del calor (ec. 2.2) y la ecuación de Fourier (ec. 2.3).

Cuando se quiere calcular la transferencia de calor a través de cerramientos convencionales, es muy común la asunción de flujo de calor monodimensional, en dirección perpendicular a la superficie del cerramiento, con lo que la resolución de las ecuaciones resulta sencilla, existiendo varios métodos de resolución incluso en el caso transitorio de variación de las condiciones de contorno.

Sin embargo, cuando en el cerramiento se incluye un material de cambio de fase, la linealidad entre entalpía y temperatura desaparece por el propio calor latente de cambio de fase del material en cuestión. Como se puede observar en la figura 2.8 el cambio de fase introduce un salto más o menos brusco en la relación entalpía-temperatura, en función de la pureza del material.

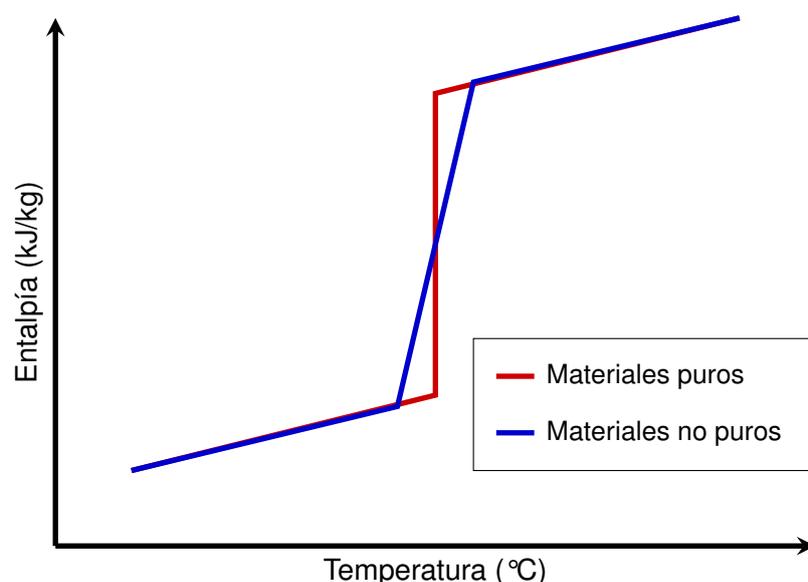


Figura 2.8: Variación de la entalpía con la temperatura

En los materiales puros, el cambio de fase ocurre de manera isoterma, con lo que el salto de entalpía ocurre en forma de escalón, a la temperatura de cambio de fase. En los materiales no puros, el cambio de fase ocurre de manera gradual, en un intervalo de temperaturas.

Aún así, y a pesar de la complejidad que conlleva la resolución de una ecuación en derivadas parciales no lineal, como es el caso de la ecuación de difusión de calor durante el cambio de fase, existen algunas soluciones analíticas de la misma, bajo condiciones muy concretas. La más importante de estas es la obtenida por Neumann en el s.XIX [76], pero también se han propuesto algunos otros métodos de resolución:

- Neuman propone estudiar el proceso de cambio de fase en un cuerpo semiinfinito, cuya frontera libre se pone repentinamente a una temperatura determinada. Impone que las propiedades térmicas del líquido y el sólido son constantes, pero diferentes entre sí, excepto la densidad. Para ello usa la condición de Stefan, ecuación 2.5, que no es más que el balance de flujo de calor-calor latente en la interfase, relacionada con la velocidad de avance de la misma, siendo  $X(t)$  la posición de la interfase.

$$k_i \frac{\partial T_i}{\partial n_i} - k_j \frac{\partial T_j}{\partial n_j} = \rho \lambda \frac{dX(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Obtiene así un resultado analítico para el campo de temperaturas y la posición de la interfase. Hay que señalar que dicho resultado es únicamente para el cambio de fase de materiales puros, esto es, para el cambio de fase isoterma.

Como ejemplo, en el caso de la solidificación de un líquido que parte de la temperatura  $T_i$ , y la superficie se pone a la temperatura  $T_0$ , las temperaturas del sólido, líquido y la posición de la interfase se calcularían mediante las siguientes expresiones:

$$T_s = T_0 + \frac{T_f - T_0}{\operatorname{erf}(\beta)} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_s t}}\right) \quad (2.6)$$

$$T_l = T_i - \frac{T_i - T_f}{\operatorname{erfc}\left(\beta\sqrt{\alpha_s/\alpha_l}\right)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_l t}}\right) \quad (2.7)$$

$$\varepsilon = 2\beta\sqrt{\alpha_s t} \quad (2.8)$$

siendo erf la función de error

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2.9)$$

y erfc la función de error complementaria

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (2.10)$$



$\beta$  es un parámetro que se obtiene de resolver la ecuación

$$\frac{e^{-\beta^2}}{\operatorname{erf}(\beta)} - \frac{k_l \sqrt{\alpha_s} (T_i - T_f) e^{-\beta^2 \frac{\alpha_s}{\alpha_l}}}{k_s \sqrt{\alpha_l} (T_f - T_0) \operatorname{erfc}\left(\beta \sqrt{\alpha_s / \alpha_l}\right)} = \frac{\beta \sqrt{\pi}}{Ste} \quad (2.11)$$

estando el número de Stefan referido a la diferencia de temperaturas de fusión y de contorno, y el calor específico del sólido.

- Balance integral de calor: Se trata de una solución analítica aproximada, obtenida por Goodman[84], que no satisface la ecuación diferencial parcial, sino su forma integrada respecto al espacio. La asunción de un perfil de temperaturas para cada una de las fases, reduce la ecuación a un sistema de ecuaciones diferenciales en el tiempo, de la que se obtiene la velocidad de avance del frente de cambio de fase.

Se trata de un método simple, pero con grandes incertidumbres respecto a la exactitud de los resultados. De todos modos, se ha sugerido su aplicación para cada uno de los elementos en el método de elementos finitos [85].

- Embebido: Se basa en tratar un cuerpo de dimensiones variables (una de las fases, o cada una de ellas) como parte de un cuerpo de mayores dimensiones y geometría tal, que existan soluciones analíticas para el mismo. Igual que en el caso anterior, es un método simple, aunque con incertidumbres, por lo que también se ha sugerido su aplicación para cada uno de los elementos en el método de elementos finitos[85]. Solo las partes del dominio mayor que coincidan con el problema real son consideradas como solución del problema.

Boley [86] lo aplica por ejemplo para casos de solidificación y fusión monodimensional.

Patera [87] propone aplicar este método junto al método de los elementos finitos. Resuelve primero el campo de temperaturas con todo el cuerpo en estado líquido, sin cambio de fase, y superpone una solución mediante funciones de Green para que se cumplan las condiciones de contorno en la interfase.

- Otros métodos: Se ha intentado usar otros métodos para la resolución de estos problemas, como la inclusión de funciones de Green [88], o el uso de términos fuente para simular la transferencia de calor durante el cambio de fase [85].

Como se puede apreciar, la complejidad asociada a los problemas de cambio de fase hace prácticamente inviable la obtención de una solución analítica exacta a la ecuación de difusión de calor, exceptuando casos muy concretos de escasa aplicabilidad. Es necesario recurrir por lo tanto a otros métodos de resolución que no requieran la resolución analítica de la ecuación. Una posibilidad es disminuir el número de variables de derivación, mediante la aplicación de transformadas integrales que transformen la derivada parcial en el tiempo en una nueva variable. Estos métodos requieren una mayor explicación, con lo que se explican en el siguiente apartado.

### 2.6.2.1. Transformaciones integrales

El uso de transformaciones integrales para reducir la complejidad asociada con la derivada parcial temporal en la ecuación de difusión es un método habitual en el análisis del comportamiento térmico de los edificios.

Entre las posibles transformaciones, una de las más empleadas es la transformada de Laplace. Esta se basa en la aplicación de la siguiente integral:

$$\mathcal{L}(h(x, t)) = h(x, s) = \int_0^{\infty} e^{-st} h(x, t) dt \quad (2.12)$$

siendo  $s$  la nueva variable integral transformada, o variable de Laplace.

Por su parte, la transformación inversa, para volver a variables temporales se obtiene a través de la siguiente operación integral:

$$\mathcal{L}^{-1}(h(x, s)) = h(x, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\xi-i\infty}^{\xi+i\infty} e^{st} h(x, s) ds \quad (2.13)$$

Esta transformación tiene la característica de transformar la derivación parcial en el tiempo por una relación lineal de la siguiente forma:

$$\mathcal{L}\left(\frac{\partial h(x, t)}{\partial t}\right) = s\mathcal{L}(h) - h|_{t=0} \quad (2.14)$$

En los casos de materiales que no sufran cambio de fase, el sistema es lineal e invariable, con lo que además de aplicar la transformación de Laplace, se puede aplicar el teorema de la convolución, con lo que se deriva en el método de los factores de respuesta, explicado en el trabajo de Clarke [89], pero que queda fuera del ámbito del presente trabajo.

En el caso del cambio de fase no se pueden aplicar ninguna de las dos condiciones necesarias para aplicar la convolución: el sistema no es ni lineal, ni invariable. Esto implica la imposibilidad de usar el método de los factores de respuesta, pero aun así, se puede aplicar la transformada de Laplace, como han demostrado varios autores.

Lin y Chen por ejemplo [90], usan un método que denominan híbrido, en donde aplican la transformada de Laplace para evitar la dependencia temporal, y en el nuevo campo de la variable de Laplace discretizan en el espacio mediante el método de elementos finitos, para resolver el campo de temperaturas transformadas. Posteriormente aplican la transformación inversa para volver al campo del tiempo. Este método se ha aplicado con posterioridad por otros autores, como Cheng [91, 92].

Otra transformación integral de gran uso en el ámbito de la edificación es la transformada Z. Se trata de una transformación aplicada a los muestreos de señales, muy extendida en el tratamiento de señales digitales. Stephenson y Mitalas [93] propusieron su empleo en el análisis térmico de los cerramientos de edificios, desarrollando el método de las funciones de transferencia de la conducción o CTF<sup>9</sup>, método posteriormente adoptado por ASHRAE [94].

<sup>9</sup>De sus iniciales en inglés, Conduction Transfer Functions



Siguiendo el planteamiento establecido por Stephenson y Mitalas [93], si se muestrea una función continua en el tiempo  $f(t)$  en intervalos regulares  $\Delta$ , la transformada de Laplace de dicho muestreo será:

$$f(0) + f(\Delta)e^{-s\Delta} + f(2\Delta)e^{-2s\Delta} + \dots \quad (2.15)$$

Si se sustituye  $e^{-s\Delta}$  por una nueva variable  $z$ , se obtiene:

$$f(0)z^0 + f(\Delta)z^{-1} + f(2\Delta)z^{-2} + \dots \quad (2.16)$$

Si se dan de nuevo las condiciones para aplicar el teorema de la convolución<sup>10</sup>, se obtienen las mencionadas funciones de transferencia de la conducción o CTF. Este método presenta importantes mejoras sobre el método de los factores de respuesta, como son un menor espacio de memoria y reducción también del tiempo de cálculo, a la vez que responde mejor al hecho de que normalmente se dispone de las funciones muestreadas, y no de la función continua en sí [93].

A pesar de que durante el cambio de fase no se cumplen las condiciones para obtener las CTFs, Barbour y Hittle [95] proponen emplear varios juegos de CTFs adicionales para calcular lo sucedido durante el cambio de fase. Para ello proponen simular la absorción o cesión de calor durante el cambio de fase como una variación en el calor específico del material<sup>11</sup>. Se calcula un nuevo juego de CTFs para cada intervalo de temperatura y variación del calor específico, que se usarán posteriormente en los cálculos en función de la temperatura en la que se encuentre el material. Para mejorar los resultados de las simulaciones, es necesario disponer de varios juegos de CTFs, además de calcular flujos de calor y temperaturas intermedias en la capa del material de cambio de fase, con lo que un método que inicialmente parecía de gran sencillez aumenta notablemente su complejidad.

Los métodos integrales solucionan el problema relacionado con la dependencia de la derivada parcial temporal, pero no consiguen simplificar realmente el problema, siendo necesario recurrir posteriormente a métodos de discretización y la aplicación de métodos numéricos para obtener resultados finales. No se elimina por lo tanto el uso de métodos numéricos, pero se añade la complejidad de realizar transformaciones de variables.

### 2.6.3. Métodos de discretización

La forma más habitual de analizar el comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase es el empleo de métodos numéricos en el que se realiza una discretización tanto del espacio como del tiempo. El cuerpo objeto de estudio es dividido en pequeños elementos en los que se considera la temperatura de todo el elemento igual a la del punto central. Se aplican entonces las ecuaciones de conservación de la energía, o la ecuación de difusión (ec. 2.2) en

<sup>10</sup>El sistema ha de ser lineal e invariante

<sup>11</sup>Esta variación del calor específico para integrar el calor latente es empleado también en otros métodos, y se conoce normalmente como método del calor efectivo, método del calor aparente. Se explicará con posterioridad aplicado a otros métodos numéricos

cada elemento y se va analizando su evolución en sucesivos instantes temporales. Se obtiene por lo tanto una serie de datos discretos en ciertos puntos e instantes.

Los métodos de discretización permiten realizar los cálculos a priori, partiendo de las propiedades físicas de los materiales, algo que los métodos indirectos no permiten<sup>12</sup>. Además los métodos de discretización permiten una mayor generalización que los métodos analíticos, siendo aplicables sin ningún tipo de restricción.

La discretización de las ecuaciones de transferencia de calor durante el cambio de fase se puede afrontar desde diferentes perspectivas, dando lugar a una amplia variedad de métodos, en función de las posibilidades que existen en cada uno de los siguientes factores:

- **Discretización espacial:** la forma en la que se subdivide geoméricamente el problema da lugar a diferentes métodos de cálculo. Tenemos así métodos en diferencias finitas, elementos finitos y elementos de frontera
- **Cambio de fase:** La fuerte no linealidad durante el cambio de fase es una de las claves para una correcta simulación de la transferencia de calor. En función de si se trata de un material puro o una mezcla, se usan diferentes métodos, como la condición de Stefan, el término fuente, el método de la entalpía, y el calor específico efectivo
- **Discretización temporal:** Algo similar ocurre con la subdivisión temporal. Normalmente se consideran sólo dos instantes de tiempo en las ecuaciones, obteniendo los esquemas explícito, implícito y de Newton. Algunos autores han propuesto también esquemas temporales a 3 niveles, en los que se utilizan datos de tres instantes consecutivos

Se van a explicar en mayor profundidad en qué se basan cada una de estas aproximaciones a continuación.

### 2.6.3.1. Discretización Espacial

Entre los métodos de discretización más habituales, hay dos familias principales, que son el método de elementos finitos y el método de diferencias finitas. Además, se ha utilizado también el método de los elementos de frontera, que en ocasiones se considera como un caso especial del método de elementos finitos. Existen otras propuestas de resolución mixtas, como la expuesta por Yano et al [96] en la que se emplean elementos finitos en la dirección radial, y diferencias finitas en la dirección angular.

**2.6.3.1.1. Elementos Finitos y Elementos de Frontera** Para obtener la expresión del método de elementos finitos para los problemas de transferencia de calor, hay que partir de la propia ecuación de la difusión del calor (ecuación 2.2):

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T)$$

<sup>12</sup>Como se verá más adelante, los métodos indirectos precisan de datos experimentales para realizar los cálculos de transferencia de calor



con las condiciones de contorno

$$T = T_w \quad \text{en} \quad \Gamma_1 \quad (2.17a)$$

$$k\nabla T \hat{n} + q + q_c + q_r = 0 \quad \text{en} \quad \Gamma_2 \quad (2.17b)$$

$$q_c = h_c (T - T_c) \quad (2.17c)$$

$$q_r = h_r (T - T_r) \quad (2.17d)$$

siendo

- $T_w$  Temperatura superficial
- $q$  Flujo de calor superficial condición de contorno
- $q_c$  Flujo de calor por convección en la superficie
- $T_c$  Temperatura de equilibrio para la convección
- $q_r$  Flujo de calor por radiación en la superficie
- $T_r$  Temperatura de equilibrio para la radiación
- $\Gamma_1$  Superficie con condiciones de temperatura especificadas
- $\Gamma_2$  Superficie con condiciones de flujo especificadas

El cuerpo objeto de estudio se discretiza en una serie de elementos con nodos localizados, que son los puntos sobre los que se aplican las ecuaciones de balance y de los que se obtienen las temperaturas. Si se construye un vector con las temperaturas nodales, se pueden aproximar mediante la relación:

$$\mathbf{T} = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) T_i(t) = \mathbf{N}\mathbf{T} \quad (2.18)$$

siendo  $\mathbf{N}$  funciones de forma definidas por partes para cada elemento.

Con la entalpía se podría realizar un proceso similar, teniendo:

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) h_i(t) = \mathbf{N}\mathbf{H} \quad (2.19)$$

Si se reescriben las ecuaciones 2.2 y 2.17 de la manera siguiente:

$$A(\mathbf{H}, \mathbf{T}) = 0 \quad \text{en} \quad \Omega \quad (2.20)$$

$$B(\mathbf{T}) = 0 \quad \text{en} \quad \Gamma \quad (2.21)$$

se puede obtener una solución del problema resolviendo las ecuaciones:

$$\int_{\Omega} W_j A(\mathbf{H}, \mathbf{T}) d\Omega + \int_{\Gamma_1} \bar{W}_j B_1(\mathbf{T}) d\Gamma + \int_{\Gamma_2} \tilde{W}_j B_2(\mathbf{T}) d\Gamma = 0 \quad j = 1 - n \quad (2.22)$$

siendo  $W_j$ ,  $\bar{W}_j$  y  $\tilde{W}_j$  funciones de peso definidas de manera que cuando  $n \rightarrow \infty$  la aproximación tiende al resultado real. Tenemos así una formulación débil del problema de la transferencia de calor [97].

Reordenando los elementos se puede observar que se tiene una ecuación matricial del tipo:

$$\mathbf{KT} + \mathbf{CH} + \mathbf{F} = 0 \quad (2.23)$$

En función del tipo de función de peso y de forma que se escoja, se obtienen distintos tipos de métodos [98]:

- Colocación por puntos: si se eligen  $W_j = \bar{W}_j = \tilde{W}_j = \delta_j(x_j)$  se obtiene el método de colocación por puntos, y en concreto si se eligen ecuaciones de forma  $N_i$  polinomiales se reconvierte en el método de diferencias finitas.
- Solución de elementos de frontera, o de integral de contorno: Si se eligen funciones de forma que satisfagan  $A(N_i) = 0$ , la ecuación 2.22 sólo incluirá la integral de contorno [99]:

$$\int_{\Gamma_1} \bar{W}_j B_1(\mathbf{T}) d\Gamma + \int_{\Gamma_2} \tilde{W}_j B_2(\mathbf{T}) d\Gamma = 0 \quad (2.24)$$

- Aproximación de Galerkin-Bubnov<sup>13</sup>: Se identifican las funciones de forma y de peso de la siguiente manera:

$$W_j = N_j \quad \bar{W}_j = N_j \quad \tilde{W}_j = -N_j \quad (2.25)$$

Si se opta por el método de Galerkin, y aplicando el teorema de Green<sup>14</sup> [98], los elementos de la matriz serán [100, 101]:

$$K_{ij} = \sum \int_{\Omega^e} k \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega + \sum \int_{\Gamma_2^e} (h_c + h_r) N_i N_j d\Gamma \quad (2.26)$$

$$C_{ij} = \sum \int_{\Omega^e} \rho N_i N_j d\Omega \quad (2.27)$$

$$F_i = \sum \int_{\Gamma_2^e} N_i (q - h_c T_c - h_r T_r) d\Gamma \quad (2.28)$$

donde las sumas se realizan sobre la región del elemento  $\Omega^e$  y el contorno del elemento  $\Gamma_2^e$  en el que sea de aplicación la condición de contorno 2.17b. A esta ecuación se le aplica ahora cualquiera de los métodos de discretización temporal. Como se puede apreciar, los elementos de las matrices están definidos de forma que son simétricos [98].

El método de elementos finitos tiene la ventaja añadida de que se pueden realizar cambios de variables espaciales de manera muy sencilla. Esto permite aplicarlo a objetos de formas irregulares [102], o realizar ajustes espaciales que simplifiquen problemas no lineales. Se trata por lo tanto de un método muy adecuado para geometrías complejas y/o condiciones de contorno no lineales [103]. En lo que respecta al cambio de fase, la facilidad de reajustar

<sup>13</sup>En muchas ocasiones citada como método de Galerkin

<sup>14</sup> $\int_{\Gamma} F d\Gamma = \int_{\Omega} \nabla \times F d\Omega$



las coordenadas espaciales lo convierte en un buen candidato para los métodos de frontera móvil<sup>15</sup>, puesto que se puede ir cambiando de forma continua la red de nodos siguiendo la evolución de la frontera, al tiempo que se puede reajustar también a las formas complejas que la interfase suele mostrar en los casos en los que la convección natural en la fase líquida es importante.

En el trabajo presente, se desea analizar la transferencia de calor a través de cerramientos, que ocurre de forma prácticamente monodimensional. En este caso no es necesario un método que se adecue a geometrías complejas, y el aumento en la carga numérica impuesto por las funciones de forma se convierte en algo contraproducente.

Además, en una comparativa realizada por Ho y Pehlke [104] demuestran que el método de diferencias finitas presenta un grado de exactitud similar al método de elementos finitos, incluso en el caso de geometrías complejas, sin más que usar redes espaciales no uniformes que se adapten a la geometría y los gradientes térmicos del problema. Todo ello además con la importante reducción del esfuerzo de programación y cálculo que presenta el método de diferencias finitas.

### 2.6.3.1.2. Diferencias Finitas <sup>16</sup>

Si se representa la ecuación de difusión del calor (ecuación 2.2) de manera monodimensional:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right] = \rho \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.29)$$

Discretizando el tiempo y el espacio, al aplicar dicha ecuación en cada elemento diferencial se realiza un balance de energía para cada uno:

$$\left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{i+1/2}^{n+\gamma} \Delta t - \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{i-1/2}^{n+\gamma} \Delta t = \rho \Delta x [h_i^{n+1} - h_i^n] \quad (2.30)$$

donde el superíndice  $n + \gamma$  denota el intervalo de tiempo en el que se deben evaluar los flujos de calor en la frontera del elemento para que represente la media de los flujos de calor durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$ .  $\gamma$  adopta valores entre cero y uno, de manera que para el valor de cero se obtiene un esquema de diferenciación explícito, y para el valor de uno un esquema completamente implícito<sup>17</sup>. El valor de 0.5 se corresponde con el esquema de Crank-Nicolson, y el de 2/3 esquema de Galerkin. Estos esquemas se van a analizar en mayor profundidad en el apartado 2.6.3.3.

Diferenciando las derivadas restantes:

$$\left[ k^+ \frac{T_{i+1}^{n+\gamma} - T_i^{n+\gamma}}{\Delta x} \right] \Delta t - \left[ k^- \frac{T_i^{n+\gamma} - T_{i-1}^{n+\gamma}}{\Delta x} \right] \Delta t = \rho \Delta x [h_i^{n+1} - h_i^n] \quad (2.31)$$

<sup>15</sup>Estos métodos se explican más adelante, como forma de inclusión del cambio de fase

<sup>16</sup>Por simplificar el desarrollo, se va a plantear sólo el caso monodimensional, que además es el de interés real para el problema objeto de estudio

<sup>17</sup>También conocido como método de Euler

Con respecto al cálculo de las conductividades a derecha e izquierda del elemento ( $k^+$  y  $k^-$ ), una gran cantidad de autores simplemente consideran la conductividad independiente de la temperatura e incluso de la fase. Sin embargo, otros autores proponen emplear una simple media aritmética entre los dos nodos implicados para dicho cálculo, de la siguiente manera:

$$k^+ = \frac{k_i + k_{i+1}}{2} \quad (2.32a)$$

$$k^- = \frac{k_i + k_{i-1}}{2} \quad (2.32b)$$

Schneider y Raw [105, 106] proponen un método para el cálculo de la conductividad dependiente de la temperatura, y que sigue la expresión obtenida por Patankar [107] para el cálculo por elementos finitos. Proponen realizar el siguiente cálculo:

$$k^+ = \frac{2k_i k_{i+1}}{\Delta x_i k_{i+1} + \Delta x_{i+1} k_i} \quad (2.33a)$$

$$k^- = \frac{2k_i k_{i-1}}{\Delta x_i k_{i-1} + \Delta x_{i-1} k_i} \quad (2.33b)$$

Mastanaiah [108] propone calcular las conductividades a las temperaturas medias, pero calculando dicha temperatura media mediante la proyección de Taylor.

### 2.6.3.2. Cambio de Fase

Debido a la gran aportación que supone el calor de cambio de fase respecto al calor sensible, el proceso de cambio de fase supone una gran variación de energía en una zona espacial reducida, muchas veces menor que la propia red de discretización propuesta, que es el frente de cambio de fase o interfase [109]. Esto provoca que se usen distintos enfoques para representar dicho aporte energético:

- Incluir el cambio de fase como condición de contorno, mediante el empleo de la condición de Stefan, separando el cuerpo en dos volúmenes diferenciados
- Uso de variables integrales, como en el método de la entalpía
- Una derivación del método de la entalpía es el del calor efectivo, que elimina la entalpía de las ecuaciones, convirtiéndola en la multiplicación de la temperatura por un calor específico efectivo o equivalente.
- Incluir el cambio de fase como una fuente (o sumidero) de calor en el problema

La elección de un método de inclusión u otro en muchas ocasiones lleva aparejada el empleo de distintos tipos de redes de discretización espacial. Las dos tipologías más importantes son las siguientes:

- Red espacial fija: la red se mantiene invariante en el tiempo. Es lo más habitual en los métodos de entalpía y de calor efectivo



- Red espacial variable: la red va cambiando a lo largo del tiempo. Normalmente se hace coincidir la interfase con la frontera entre elementos, de manera que se pueden aplicar ecuaciones diferentes del lado del líquido y del sólido. Al ir moviéndose la interfase, la red irá variando su configuración. Es muy habitual con la condición de Stefan, o cuando se desea incluir la convección natural en la fase líquida. Al no conocer la posición de la interfase a priori en cada nuevo intervalo de tiempo, esta ha de ser resuelta junto con el campo de temperaturas, como parte del problema. Es un método adecuado sobre todo para el estudio de la evolución de materiales puros, donde la interfase forma una superficie clara y distinguible, aunque también se puede aplicar a otro tipo de materiales.

Se va a pasar a continuación a explicar cada una de estas aproximaciones.

**2.6.3.2.1. Condición de Stefan** La condición de Stefan no es más que aplicar el principio de conservación de la energía en la interfase sólido-líquido. En esta interfase se da una discontinuidad entre la transferencia de calor a ambos lados, debido a la absorción o cesión de energía en forma de calor latente, tal y como se expresa en la siguiente ecuación:

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial x} = \rho \lambda \frac{\partial X}{\partial t} \quad (2.34)$$

siendo  $\lambda$  el calor latente de cambio de fase, y  $X$  la posición de la interfase.

Esta condición se conoce como condición de Stefan, en honor al investigador que en 1890, estudió el problema de solidificación de una placa semiinfinita de hielo, inicialmente a  $0^\circ$ , llegando a la formulación de dicha condición. Hay que señalar que dicho problema ya había sido estudiado con anterioridad por Lamé y Clapeyron, en 1831 [85].

La resolución se basa en representar la ecuación de difusión de calor para cada una de las fases por separado, aplicando para ello la definición del calor sensible. En ausencia de cambio de fase:

$$dh = c_i dT \quad (2.35)$$

con lo que la ecuación de difusión de calor se puede representar como<sup>18</sup>:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) \quad (2.36)$$

haciendo referencia el subíndice  $i$  a cada una de las fases. Añadiendo estas dos ecuaciones a la condición de Stefan, el problema queda cerrado y es por lo tanto resoluble.

La condición de Stefan se ha de usar en el caso de materiales puros, en los que el cambio de fase ocurre de manera isoterma. Cuando se trata de un material no puro, el cambio de fase ocurre durante un intervalo de temperaturas, en el que se forma una zona intermedia de mezcla entre el estado sólido y el líquido. En ese caso, se debe aplicar la ecuación de

<sup>18</sup>Como ya se ha comentado con anterioridad, el presente trabajo se centra en el estudio del cambio de fase monodimensional, con lo que a partir de ahora se va a pasar a representar en general las ecuaciones únicamente en una de las direcciones espaciales

difusión (ecuación 2.36) a cada una de las regiones, como son el sólido, el líquido, y la región de mezcla, y añadir la condición de conservación de flujo de calor en la interfase entre cada región, además de la condición de continuidad de la temperatura. Esto supone una complejidad añadida, al tener que realizar un seguimiento continuo de dos interfases diferentes. A pesar de la problemática añadida hay algún trabajo que sigue esta línea, como el realizado Gupta [110].

Este método, al dividir el cuerpo en regiones diferenciadas<sup>19</sup>, permite y al mismo tiempo necesita una buena definición de la posición de la interfase. Suele ir ligado a redes de discretización espacial variables, que se van moviendo al mismo tiempo que avanza la interfase, y se pueden adaptar con facilidad<sup>20</sup> a interfases de formas complejas como las que se dan en los casos de existencia de convección natural en la fase líquida.

Esta readecuación continua de la red de discretización, para adaptarse en todo momento a la posición y forma de la interfase se puede realizar de varios modos [111]:

- Deformación o alteración de la red [112]
- Transformación de variables o coordenadas [113]. Mención especial merece la transformación de variables de Landau [114], que inmoviliza la interfase, y la sitúa en el origen del nuevo sistema de coordenadas. Muchas de las transformaciones de variables y coordenadas posteriores están basadas en mayor o menor medida en su propuesta. También se ha desarrollado para problemas en 3 dimensiones [115].
- Algoritmos especiales en la zona de cambio de fase [116, 117]
- Selección del intervalo de tiempo de forma que el cambio de fase coincida con nodos de la red [117]

El método de red variable supone una buena opción en los casos en los que la posición de la interfase sea un dato prioritario de la resolución del problema, y resulta adecuado para los materiales puros que presentan una interfase definida. Todo ello se ha de realizar a costa de un aumento de la complejidad de cálculo debido a la constante transformación de coordenadas que se debe realizar.

Murray y Landis [75] usan la condición de Stefan en una de sus propuestas para mejorar la definición de la interfase. En ella, emplean un número de nodos fijos en cada fase, de manera que el espaciado entre nodos va variando según avanza el cambio de fase. Este mismo método es usado por otros autores, como Mastanaiah [108]. Kroeger y Ostrach [15] también emplean la condición de Stefan en su análisis del proceso de forja con metales.

Saitoh [118] se basa en el mismo método de cambio de variables, pero incluye también la posición de la frontera fija, límite del cuerpo, en la definición de la nueva variable de posición. Saitoh y Hirose [119] aplican posteriormente este método para el caso de solidificación de un cilindro horizontal, incluyendo la influencia de la convección natural en la fase líquida.

<sup>19</sup>Sólido y líquido en el caso de materiales puros. En el caso de materiales no puros se crea una tercera región de mezcla

<sup>20</sup>Normalmente mediante transformaciones de coordenadas



Voller y Cross [117] analizan las discrepancias y errores de la aplicación de la condición de Stefan en ecuaciones discretas<sup>21</sup>, cuando se emplea una red espacial fija. En este tipo de sistemas de resolución se observa una oscilación de la respuesta alrededor de la respuesta analítica. Según los autores el mayor problema proviene de estimar la temperatura de los nodos que se encuentran cambiando de fase. Para encontrar una solución a este problema, proponen usar un intervalo temporal variable, de forma que de un instante al siguiente el frente de cambio de fase vaya saltando de nodo en nodo. De esta forma, al coincidir el frente con la posición del nodo, la mitad del elemento se haya en fase líquida y la otra mitad en fase sólida, y la temperatura del nodo es exactamente la temperatura de cambio de fase. En cada nuevo intervalo de tiempo, se va iterando con el valor de  $\delta t$  hasta que la nueva posición del cambio de fase coincide con el siguiente nodo en la dirección de avance del frente.

Posteriormente los mismos autores [120] proponen para aquellos casos en los que no se hace coincidir la posición de la interfase con un nodo, que la posición de dicha superficie en un elemento que esté en transición se puede obtener con suficiente aproximación mediante una simple interpolación usando como variable la entalpía de dicho elemento. Esta aproximación se basa en su demostración de que la velocidad de variación de la entalpía en un elemento que cambia de fase es proporcional a la velocidad en la que ocurre el cambio de fase en dicho elemento [121].

Una propuesta similar es la realizada por Askar [122]. En su trabajo propone usar elementos finitos con un nodo central móvil. En lugar de ir adecuando el intervalo temporal lo que hace es mover ese nodo central de manera que coincida con el frente de cambio de fase en todo momento.

Crivelli e Idelsohn [123] proponen un método en el que a pesar de usar la temperatura como variable principal, evitan el problema asociado a la discontinuidad de la relación entalpía-temperatura. Para ello proponen aplicar el método de elementos finitos, y realizar una integración por partes en aquellos elementos en los que se encuentre la interfase sólido-líquido. Esos elementos se subdividen en cada una de las fases presentes, se vuelven a mapear en un nuevo sistema de coordenadas, y se realiza la integración para cada uno de los subelementos, sumándose posteriormente cada una de las aportaciones para obtener el valor del residuo de dicho elemento. En la interfase entre los dos nuevos subelementos generados se aplica la condición de Stefan. Evitan de esta forma tener que suavizar la relación entalpía-temperatura para reducir su no-linealidad, como ocurre en muchos de los métodos que emplean el calor específico efectivo, como se explicará más adelante. Rubinsky y Cravahlo [112] ya habían propuesto una solución similar con anterioridad.

En general, estos métodos presentan una buena precisión a la hora de definir la posición de la interfase, pero adolecen de gran complejidad de programación, coste de cálculo y dificultad de aplicación en materiales no puros [16].

En el presente trabajo la posición de la interfase es un dato prescindible, con lo que la ventaja de este método no va a ser realmente aprovechable. Además de esto, los materiales

<sup>21</sup>El término de ecuaciones discretas se refiere a los métodos de diferencias finitas y elementos finitos

empleados presentan un intervalo de cambio de fase, con lo que la complejidad añadida de las transformaciones de coordenadas es mayor al tener que considerar tres regiones en el cuerpo. Por estos motivos se va a descartar el empleo de estas técnicas en el desarrollo del trabajo.

**2.6.3.2.2. Método de la entalpía** El método de la entalpía se basa en el empleo directo de la ecuación de difusión 2.2:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla (k \nabla T)$$

Considerando que la entalpía incluye en su formulación el valor del calor latente de fusión, la condición de Stefan queda integrada en el problema, como ya demostraron Shamsundar y Sparrow [124].

El hecho de no incluir la posición de la interfase como parte del problema supone un ahorro del coste computacional de este método. Como contrapartida hay que considerar una menor exactitud en el cálculo de la posición de dicha interfase, siendo necesario emplear redes de discretización más finas para obtener buenos resultados [113].

Un problema conocido de este tipo de métodos es la dependencia de la convergencia y precisión con el número de Stefan.

$$Ste = \frac{c_p(T_l - T_s)}{\lambda} \tag{2.37}$$

A números de Stefan bajos, la convergencia se dificulta y empeora la exactitud de los resultados debido a la fuerte no linealidad de esas condiciones. Lo que sucede es que al disminuir el número de Stefan, la velocidad de avance del frente se ralentiza, mejorando la exactitud con respecto a la definición de su posición, pero aumentando al mismo tiempo las oscilaciones de las predicciones de temperatura en su entorno [16].

La ecuación de la difusión (2.2) tiene dos variables independientes, entalpía y temperatura, con lo que se ha de resolver de manera conjunta a la relación existente entre ambas. El cambio brusco que sufre la entalpía durante el cambio de fase<sup>22</sup> puede requerir un tratamiento especial, sobre todo en los materiales puros, debido a la fuerte no-linealidad existente. Debido al uso de estas dos ecuaciones<sup>23</sup>, se hace necesario resolver el problema por métodos iterativos.

Si bien no son los primeros en emplear este método, son Shamsundar y Sparrow [124] quienes lo sistematizan. Los autores aplican la ecuación de la difusión de calor de manera integral al conjunto del cuerpo, o en su caso a cada uno de los elementos diferenciales. Integrando en el espacio la ecuación 2.2 y aplicando el teorema de la divergencia al lado derecho de la ecuación, se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho h dV = \iint_A k \nabla T \hat{n} dA \tag{2.38}$$

Para facilitar la generalización del método, los autores definen dos variables adimensiona-

<sup>22</sup> Como se aprecia en la figura 2.8

<sup>23</sup> La ecuación de difusión del calor, y la relación temperatura-entalpía



les. Por un lado, la entalpía adimensional, definida como:

$$\phi = \frac{1}{\rho V} \iiint_V \rho \frac{h - h_s^*}{\lambda} dV \quad (2.39)$$

También definen una temperatura adimensional, de la siguiente forma<sup>24</sup>:

$$\theta = c_s \frac{T - T_s^*}{\lambda} \quad (2.40)$$

siendo  $c_s$  el calor específico en estado sólido, y  $T_s^*$  y  $h_s^*$  la temperatura y entalpía del estado de sólido saturado, respectivamente.

La definición de las variables adimensionales de esta manera, aporta una gran facilidad a la hora de determinar el estado en el que se encuentra cada elemento, como se puede apreciar en la tabla 2.2.

	Sólido	Interfase	Líquido
$\phi$	$\phi \leq 0$	$0 \leq \phi \leq 1$	$\phi \geq 1$
$\theta$	$\theta \leq 0 ; \phi = \theta$	$\theta \geq 0$	$\theta \geq 0$

Tabla 2.2: Variables adimensionales en las distintas fases

De esta forma con una simple observación de los valores, sobre todo de la entalpía adimensional, se puede definir con gran facilidad la región en la que se encuentra cada uno de los elementos. Esta definición además facilita mucho el cálculo en los elementos que se encuentran en estado sólido, puesto que para esos elementos basta con igualar entalpía y temperatura adimensionales para resolver con facilidad el campo de temperaturas.

A pesar de que el método de la entalpía en sí no lo requiere, en el desarrollo realizado por Shamsundar se supusieron todas las propiedades termofísicas constantes con la temperatura. Esto simplifica las expresiones obtenidas, aunque puede suponer cierto error el no considerar las variaciones de conductividad, calor específico y densidad con la temperatura, sobre todo en los casos en los que se produzcan variaciones de temperatura importantes. Aun así, en un trabajo posterior los autores consideraron el caso de densidad variable con la fase [83].

A pesar de la aparente ventaja que presenta el uso de números adimensionales en la resolución de problemas mediante el método de la entalpía, también hay autores que lo han usado sin realizar el cambio de variables, incluyendo directamente los valores de la entalpía en función de la temperatura. En estos casos, para facilitar la resolución de las ecuaciones, se

<sup>24</sup>En el trabajo original los símbolos para ambas variables aparecen intercambiados, usando los autores  $\theta$  para la entalpía adimensional y  $\phi$  para la temperatura adimensional. En el presente trabajo se ha decidido cambiar dicha nomenclatura por ser más habitual usar la letra  $\theta$  para representar la temperatura adimensional

tiende a representar la entalpía del PCM mediante una función lineal por partes de la forma:

$$h(T) = \begin{cases} c_{p,s} \cdot T & T < T_{s*} \\ c_{p,l} \cdot T + \frac{\lambda(T - T_{s*})}{T_{l*} - T_{s*}} & T_{s*} < T < T_{l*} \\ c_{p,l} \cdot T + \lambda & T_{l*} < T \end{cases} \quad (2.41)$$

Como ejemplo, este método se ha usado recientemente por Tehrani et al [126] para modelar el proceso de cambio de fase en un intercambiador de carcasa-tubos de alta temperatura para centrales solares termoeléctricas.

**2.6.3.2.3. Calor efectivo** Al usar el método de la entalpía es necesario resolver una ecuación con dos variables independientes, entalpía y temperatura, para lo que es necesario recurrir a la relación existente entre ambas y resolver mediante métodos iterativos.

Para evitar esta complicación, el método del calor efectivo<sup>25</sup> incluye en la ecuación de la difusión del calor la relación existente entre entalpía y temperatura, mediante la definición de una nueva propiedad, el calor efectivo, que se obtiene de la siguiente relación:

$$c_{eff} = \frac{\partial h}{\partial T} \quad (2.42)$$

Como se puede observar, esta definición incluye el calor específico o sensible, más el calor latente durante el cambio de fase. Con esta definición, la ecuación de difusión del calor quedaría así:

$$\rho c_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k \nabla T) \quad (2.43)$$

Este método sobre todo es válido para simular sustancias no puras, puesto que en una sustancia pura la transición de fase ocurre a temperatura única, y el calor específico efectivo adquiere la forma de una función  $\delta$  de Dirac, siendo necesario en ese caso un tratamiento especial para contabilizar el cambio de fase.

A pesar de la ventaja de eliminar una de las variables de la ecuación, se pueden provocar errores importantes en el caso de variaciones de temperatura moderadamente rápidas, en las que los elementos podrían pasar de estado sin contabilizar el calor latente de cambio de fase [100]. Esto es debido a que se utiliza como base de cálculo una variable que es diferencial (el calor específico efectivo), y se evalúa únicamente en los estados inicial y final de cada elemento. La variable integral (entalpía) por el contrario cuantificaría el total de las transferencia de energía sucedida, integrando el proceso completo de variación de entalpía.

En 1973, Bonacina et al. [127] aplicaron el concepto del calor específico efectivo para llegar a la formulación del método de la entalpía<sup>26</sup>.

Un año más tarde los mismos autores demostraron [128] que la ecuación de transmisión

<sup>25</sup> Este método también aparece citado en numerosos artículos como método del calor específico equivalente, o método de la capacidad térmica equivalente

<sup>26</sup> En su trabajo optan por el método de la entalpía, expresado en función del calor específico efectivo. Para ello de todos modos llegan previamente a la definición del método de la entalpía general.



de calor en su forma débil<sup>27</sup> es insensible a la forma que adopta la curva  $c_p$ - $T$ , siempre que se mantenga la cantidad total de variación de entalpía. Este descubrimiento permite plantearse formas alternativas del cálculo del calor específico efectivo que eviten el problema del salto de la zona de cambio de fase comentado con anterioridad.

Para mejorar la definición del calor efectivo local, Comini et al. [100] proponen un análisis del gradiente local del calor específico efectivo en cada nodo, y la obtención de un valor promedio en cada elemento en función de dicho gradiente, de la siguiente forma:

$$\rho c_{eff} \cong \frac{1}{3} \left( \frac{\partial H / \partial x}{\partial T / \partial x} + \frac{\partial H / \partial y}{\partial T / \partial y} + \frac{\partial H / \partial z}{\partial T / \partial z} \right) \quad (2.44)$$

De esta forma, además de considerar la variación del calor específico con la temperatura, se incluye la variación local de la temperatura en la ecuación, contabilizando mejor la contribución del cambio de temperaturas de cada elemento. Se contabiliza también la posible cercanía de la interfase, reduciendo el problema mencionado previamente de salto del pico de calor efectivo.

Lemmon [129] propone otro método muy similar para calcular el calor efectivo de un elemento basándose en la derivada local que presenta la curva de la entalpía. En concreto plantea calcular la pendiente en dirección normal a la interfase, de la siguiente forma:

$$c_{eff} = \left\{ \frac{(\partial h / \partial x)^2 + (\partial h / \partial y)^2 + (\partial h / \partial z)^2}{(\partial T / \partial x)^2 + (\partial T / \partial y)^2 + (\partial T / \partial z)^2} \right\}^{1/2} \quad (2.45)$$

Este método también fue usado por Thomas [102], y ambos dicen obtener buenos resultados, a pesar de que Lemmon reconoce que se trata sólo de una aproximación. Morgan [130] lo menciona como posibilidad, a pesar de que se termine decantando por una simple diferencia anterior para calcular la pendiente de la derivada, como aparece en la ecuación 2.47. Zabarás [131] lo usa para la resolución de un problema inverso, en el que obtener el flujo de calor superficial derivándolo de los datos conocidos de unos termopares.

Del Guidice [101] propone también evaluar el calor efectivo a través de la pendiente direccional, de una manera muy similar a la de Lemmon:

$$c_{eff} = \frac{(\partial h / \partial x) (\partial T / \partial x) + (\partial h / \partial y) (\partial T / \partial y) + (\partial h / \partial z) (\partial T / \partial z)}{(\partial T / \partial x)^2 + (\partial T / \partial y)^2 + (\partial T / \partial z)^2} \quad (2.46)$$

Este método también fue empleado por Thomas [102], quien obtuvo buenos resultados.

Un análisis posterior por parte de Morgan et al. [130] propone evaluar el calor específico efectivo de manera más sencilla, sin pérdida apreciable de exactitud. Para ello utilizan una diferencia finita anterior de la entalpía:

$$\rho c_{eff} \cong \frac{H^m - H^{m-1}}{T^m - T^{m-1}} \quad (2.47)$$

<sup>27</sup>La empleada en la resolución por diferencias finitas y por elementos finitos

De todos modos, esta aproximación al estar referida al estado anterior va a suponer una evaluación retrasada del calor efectivo, y en ocasiones los resultados van a mostrar un comportamiento oscilatorio [111].

Yao y Chait [132] demostraron con posterioridad que esta técnicas de evaluación, si bien mostraban buenos resultados con intervalos temporales pequeños y medios, presentaban grandes desviaciones para intervalos temporales dilatados. De los métodos propuestos, los basados en promedios espaciales<sup>28</sup> son los que mejores resultados dan, incluso para intervalos temporales 10 veces mayores al límite de estabilidad del método explícito. Para casos de intervalos mayores, propone sustituir el calor específico efectivo por el calor específico nominal, definido de la forma:

$$c_{nom}T = \int_{T_{ref}}^T c_{eff}(\theta)d\theta \quad (2.48)$$

Otro de los problemas que representa este método es la inclusión de los materiales puros. Estos cambian de fase a una temperatura única, en donde el calor específico efectivo tiende a infinito, y por lo tanto no es posible representarlos directamente.

En 1983 O'Neill [109] propone una nueva manera de acomodar el cambio de fase de sustancias puras. Para ello propone utilizar la función delta de Dirac para representar el calor específico efectivo de la sustancia de la siguiente manera:

$$c_{eff} = c + \lambda\delta(T - T_0) \quad (2.49)$$

La función delta de Dirac posee la ventaja de que la integral de su producto por una función cualquiera da como resultado el valor de dicha función en el punto en el que la función delta es discontinua:

$$\int f\delta(T - T_0)dT = f(T_0) \quad (2.50)$$

Cuando un elemento traspasa la temperatura de cambio de fase, se modifica el cálculo en dicho elemento, pasando de ser una integral en el espacio a ser una integral en el campo de temperaturas.

Otra manera de solventar este problema es simulando el cambio de fase de materiales puros como el de los materiales no puros, con un rango de temperaturas de cambio de fase ficticio y muy estrecho. Como ya se ha comentado anteriormente, Bonacina et al. [128] demostraron la escasa influencia de la forma que presenta la curva  $c_p$ -T en este tipo de formulaciones, siempre que se mantenga la cantidad total de variación de entalpía.

A pesar de ello, se debería elegir un intervalo de temperaturas  $\Delta T$  adecuado, lo suficientemente pequeño como para que sea representativo del proceso real; pero al mismo tiempo, lo suficientemente amplio como para que el valor del calor específico efectivo no resulte demasiado elevado, provocando oscilaciones en los resultados [133].

Bonacina [127] propone que para evitar oscilaciones debido a la fuerte no linealidad del

<sup>28</sup>Comini, Lemmon, Del Guidice



calor específico, se debe usar un intervalo de cambio de fase y un espaciado entre nodos suficiente para que el cambio de fase abarque al menos a 2-3 nodos.

Morgan [130] coincide en cierta manera con este dato, al encontrar una buena concordancia en los resultados cuando se eligen el intervalo de tiempo y el de cambio de fase de manera que cada elemento tarde más de un intervalo de tiempo en tener un cambio de fase completo, de forma que simultáneamente se tendrían 2 o 3 elementos cambiando de fase.

Hsiao [133] propone otra forma de solventar este problema. Para ello, introduce un calor específico modificado para los cálculos de cada uno de los nodos. Este nuevo calor específico es el correspondiente a la interpolación lineal de temperaturas con los nodos circundantes. Para el caso monodimensional:

$$c_i^{corr} = \frac{1}{2} [c(T_{i-1}, T_i) + c(T_{i+1}, T_i)] \quad (2.51)$$

siendo

$$c(T_{i-1}, T_i) = c\left(\frac{T_{i-1} + T_i}{2}\right) \quad (2.52)$$

Con este calor específico definido, el método de resolución es insensible al intervalo de cambio de fase elegido, según el autor.

**2.6.3.2.4. Término fuente** Murray y Landis [75] son los primeros en analizar en 1959 un método alternativo para simular el cambio de fase en materiales puros, basado en el término fuente. Para ello, aplican la ecuación de la difusión del calor (ecuación 2.2) hasta que uno de los elementos llega a la temperatura de cambio de fase. A partir de ese momento el algoritmo mantiene la temperatura del elemento constante hasta que se ha transferido toda la energía de cambio de fase. Una vez concluido el cambio de fase, el elemento retoma la formulación normal de la difusión del calor. El cambio de fase se representa de esta forma como una fuente o un sumidero de calor (dependiendo del sentido del cambio de fase), que se va desplazando de elemento en elemento.

El punto débil de este método se halla en que no es capaz de definir la posición del frente de manera continua, ni de dar la temperatura de puntos cercanos al mismo, datos que pueden ser de vital importancia en muchos problemas de cambio de fase, al ser determinante en fallos mecánicos y térmicos de muchos materiales. Proponen dos métodos para solucionar este problema:

- El primero se basa en una discretización espacial variable. El número de elementos de las fases sólidas y líquidas se mantienen siempre constante, de manera que estos aumentan de tamaño en el sólido al avanzar el frente de solidificación, y disminuyen en el líquido. Este método permite determinar con exactitud el avance del frente, pero las temperaturas cercanas al mismo se deben determinar por interpolación. Se trata por lo tanto de un método de red móvil.
- El segundo método se basa en una red de discretización fija. Pero en este caso, no se

supone que el elemento en el que se encuentra el frente se mantiene a la temperatura de fusión. Para este elemento se asume una discontinuidad en las temperaturas a la altura del frente de fusión, y se calculan dos temperaturas por interpolación, una para usar del lado del sólido, y la otra para usar del lado del líquido. Este método permite un buen cálculo de las temperaturas cerca del frente de fusión, y un cálculo en continuo del avance del frente, pero es sensible a errores de cálculo inicial que decrecen rápidamente.

Ambos métodos son probados y contrastados con soluciones analíticas y experimentales conocidas, y comparados con el resto de métodos. Demuestran un buen comportamiento, tanto en exactitud como en simplicidad de cálculo.

Budhia y Kreith [134] proponen un método de resolución por superposición de dos soluciones diferentes:

- Resolución del campo de temperaturas sin considerar el cambio de fase, y aplicando la ecuación de difusión del calor 2.2
- Fuente de calor móvil que se desplaza por el cuerpo partiendo de una temperatura cero, y que simula el cambio de fase.

Para poder usar este método necesitan suponer que el cambio de fase ocurre a una temperatura única, y que las propiedades del material son constantes con la temperatura, e iguales en el estado sólido y líquido. Resuelven los campos de temperatura aplicando la función de Green a cada uno de los casos.

Un método muy similar es el seguido por Li et al. [135] en 1984. Usan el método de superposición en un problema en dos dimensiones. Para la solución del problema sin fuentes proponen hacerlo por separación de variables, o por el método de diferencias finitas de alternado de dirección<sup>29</sup>. Para la solución de la fuente móvil proponen emplear las funciones de Green, pero sólo para la dirección preferente de cambio de fase. En la dirección en la que el cambio de fase es menor proponen cambiar la derivada direccional por una diferencia finita.

Li et al. [136] emplean el mismo método para modelizar un depósito de almacenamiento térmico. En este caso acoplan las ecuaciones correspondientes al cambio de fase con la ecuación de transferencia de calor convectivo para el fluido de transferencia de calor de la unidad de almacenamiento.

El empleo de los términos fuente como lo hacen los autores anteriores se basa en el cambio de fase isoterma de los materiales puros. En el caso de materiales no puros, con cambio de fase en un rango de temperaturas, el método se puede aplicar usando un calor específico de mezcla, y la fracción líquida del elemento que se encuentra en cambio de fase [137]. La fracción líquida se puede relacionar con la temperatura a través de varios modelos existentes, con lo que junto a la aplicación del método de calor efectivo, se obtiene un sistema de ecuaciones dependiente únicamente de la temperatura. Voller y Swaminathan proponen además linealizar el término fuente, para agilizar la convergencia del sistema, sin pérdida notable de exactitud.

<sup>29</sup>También conocido como método ADI, muy usado en la resolución de los problemas de transferencia de calor en dos dimensiones



Ozisk propone en 1978 [138] una formulación general para resolver el cambio de fase de materiales puros considerando el cambio de fase como una fuente de calor, y usando funciones de Green para hallar el campo de temperaturas del cuerpo.

Un método muy similar es el seguido por Choi y Hsieh para el estudio de los cambios de fase con condiciones de contorno cíclicas [139]. Bajo esas condiciones es habitual que se formen varios frentes de cambio de fase, cada uno de los cuales es representado mediante una fuente o un sumidero de calor. Esto da lugar a una serie de ecuaciones integro-diferenciales que se deben resolver de manera numérica mediante linealización local, y con el empleo de las funciones de Green.

Rolph y Bathe en 1982 [140] proponen un método particular para calcular el cambio de fase iterando de manera simultánea con la temperatura y el flujo de calor. Dalhuijsen y Segal clasifican este método en la categoría de métodos de flujo de calor ficticio [111].

Los autores proponen crear un vector en el que contabilizar la cantidad de calor latente acumulado en cada elemento. Cuando un elemento cae en la zona de cambio de fase, o la traspasa, dependiendo de si es material puro o no, actúan de la siguiente manera:

- Materiales puros: Al pasar por la zona de cambio de fase, se mantiene la temperatura del elemento constante y se va acumulando el flujo de calor hasta que el calor almacenado supera la capacidad total de calor latente de ese elemento.
- Materiales no puros: En estos materiales el cambio de fase no ocurre a temperatura constante, sino en un intervalo de temperaturas  $\Delta T$ . Cuando el nuevo dato de temperatura cae en la zona de cambio de fase, se calcula la acumulación de calor latente mediante un calor específico modificado de la siguiente manera:

$$c_{eff} = \frac{1}{\frac{\Delta T}{\lambda} + \frac{1}{c^{k-1}}} \quad (2.53)$$

haciendo referencia el superíndice del calor específico del denominador a la iteración anterior.

Con este dato se calcula el calor latente acumulado y la nueva temperatura del nodo:

$$\Delta Q_{lat} = - \int \frac{1}{\Delta t} \rho c_{eff} (T^{n+1} - T_s + T^n) dV \quad (2.54)$$

$$T_{corr} = T_s - T^{n+1} + \left[ \frac{Q_{lat}}{Q_{lat,total}} \right] \Delta T \quad (2.55)$$

Se mantienen estos cálculos hasta que el calor acumulado supere el calor latente disponible, y al mismo tiempo la temperatura del elemento supere la de cambio de fase.

Este método se verifica con otros métodos disponibles, mostrando una buena correlación en sus resultados.

Roose y Storrer [141] usan el mismo método incluyendo mejoras en cuanto a la estabilidad y la velocidad de convergencia. Para mejorar la estabilidad proponen usar subrelajación en las

primeras iteraciones, y para acelerar la convergencia, sobrerrelajación en las últimas iteraciones. Como alternativa a la sobrerrelajación también proponen bloquear la temperatura de un nodo a la temperatura de cambio de fase en las últimas iteraciones, cuando esta se encuentre lo suficientemente cerca.

### 2.6.3.3. Discretización Temporal

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, en función del momento en el que se evalúan las propiedades y variables del sistema a estudio, se pueden obtener distintos esquemas de discretización temporal, que conllevan estrategias de resolución diferentes. Se va a proceder a analizar cada uno de los esquemas más habituales.

Como introducción, y retomando la ecuación 2.31, los valores de  $\gamma$  superiores a 0.5 producen esquemas implícitos incondicionalmente estables, en el sentido de que los errores de aproximación no se ven aumentados al avanzar en la solución. Valores menores a 0.5 por el contrario producen esquemas explícitos de estabilidad condicionada, siendo por lo tanto crítica la elección de un intervalo temporal adecuado. Finalmente el valor de 0.5 intermedio<sup>30</sup> a pesar de ser incondicionalmente estable, puede presentar oscilaciones o ruido para intervalos de tiempo elevados, con lo que se considera como marginalmente estable [103].

Estos métodos presentan en general un grado de error de orden  $O(\Delta t + \Delta x^2)$ . El método implícito da una aproximación superior a la solución exacta, mientras que el método explícito da una aproximación inferior. Sin embargo, el método de Crank-Nicolson ( $\gamma=0.5$ ) se puede entender como una combinación de ambos, en el que las desviaciones se ven compensadas, alcanzando un mayor grado de exactitud con un error de orden  $O(\Delta t^2 + \Delta x^2)$  [142]. Es precisamente esta mayor exactitud la gran ventaja de este método.

**2.6.3.3.1. Esquema explícito** En este esquema, se evalúa la entalpía en el nuevo instante de tiempo, en función de los valores conocidos del estado anterior de los elementos adyacentes. Por ejemplo, retomando la ecuación 2.31 y reemplazando  $\gamma$  por el valor de 0, se obtiene:

$$\left[ k^+ \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x} \right] \Delta t - \left[ k^- \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta x} \right] \Delta t = \rho \Delta x [h_i^{n+1} - h_i^n] \quad (2.56)$$

Como se puede observar, se trata de una ecuación explícita, de la que es posible obtener los valores de entalpía de todos los elementos en el nuevo intervalo de tiempo  $n+1$ , conocidos los valores de temperaturas y entalpías del instante anterior  $n$ . De esta forma, partiendo de las condiciones iniciales del problema, es posible obtener los valores de entalpía y temperatura a lo largo del tiempo directamente para cada elemento, sin necesidad de recurrir a la resolución de sistemas de ecuaciones como va a suceder con el resto de esquemas. Esto supone una gran ventaja en cuanto a ahorro computacional.

Como contrapartida, esta ecuación es inestable, presentando fluctuaciones en los resultados si no cumplimos con unas condiciones límite. En concreto, para que la resolución sea

<sup>30</sup>Correspondiente al esquema de Crank-Nicolson



estable, es necesario que se cumpla:

$$\Delta Fo \equiv \frac{k}{\rho c} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} < \frac{1}{2} \quad (2.57)$$

Esta condición requiere normalmente del empleo de una discretización espacial y temporal fina, con un gran número de elementos de pequeño tamaño y muchos intervalos temporales. Dependiendo de las propiedades del material, esto va a conllevar la desventaja de tener que calcular un gran número de valores, con lo que la ventaja inicial de no requerir la resolución de sistemas de ecuaciones puede verse revertida [143].

Además de la influencia del número de Fourier en la estabilidad del algoritmo, el número de Stefan<sup>31</sup> también influye, siendo necesarios intervalos de tiempo menores al aumentar el valor de Stefan [144].

Este método fue usado por ejemplo por Hong et al [145] para modelizar procesos de forja. Para ello usaron el método de las diferencias finitas para la zona de solidificación, acoplándolo con elementos de frontera en la zona del molde. Regin et al [146] usan el esquema explícito para resolver el método de la entalpía (explicado más adelante) para un sistema de almacenamiento basado en cápsulas esféricas de parafina.

**2.6.3.3.2. Esquema implícito** En este esquema, los valores del nuevo intervalo de tiempo no quedan explícitamente determinados por los del anterior, sino que dependen de los nuevos valores de temperatura de los nodos adyacentes. Retomando la ecuación 2.31 y reemplazando  $\gamma$  por el valor de 1, se obtiene:

$$\left[ k^+ \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{\Delta x} \right] \Delta t - \left[ k^- \frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{\Delta x} \right] \Delta t = \rho \Delta x [h_i^{n+1} - h_i^n] \quad (2.58)$$

Se obtiene para cada nuevo intervalo de tiempo un sistema de ecuaciones a resolver, proceso que puede resultar costoso. Para el proceso de resolución se suelen usar métodos iterativos habituales como Gauss-Seidel, o Newton-Raphson.

Este esquema es totalmente estable, con lo que no es necesario controlar el tamaño de la red espacial, ni los intervalos de tiempo. Aún así, y atendiendo al grado de error de este método, que es del orden de  $O(\Delta t + \Delta x^2)$ , tampoco es posible usar elementos ni intervalos temporales amplios, si queremos mantenernos dentro de un grado de exactitud razonable. Esto unido al hecho de que es necesario implementar procesos iterativos para la resolución de cada intervalo temporal hacen que la ventaja relativa con respecto al esquema explícito sea marginal, desde el punto de vista del coste computacional.

Shamsundar et al. [124, 83], en su análisis del método de la entalpía, emplean el esque-

<sup>31</sup>La influencia del número de Stefan en este caso es calculada con la diferencia de temperaturas entre el contorno y la temperatura de fusión

$$Ste = \frac{c_p |T_{cont} - T_f|}{\lambda}$$

ma implícito, resolviendo el sistema de ecuaciones mediante Gauss-Seidel. Para inicializar el método iterativo, proponen usar las temperaturas del intervalo anterior.

Voller [147] emplea también el esquema implícito, y se centra en proponer un método iterativo de resolución que sea más eficiente a la hora de manejar el cambio de fase, reduciendo el coste computacional. Durante el cambio de fase, la no linealidad entre entalpía y temperatura provoca que sea necesario recalcular los elementos de las matrices de resolución del método de Gauss-Seidel, lo que aumenta de forma notable el tiempo de cálculo. Voller propone separar el término del calor latente del intercambio total de calor, creando para ello un término fuente. De esta forma, mientras no haya cambio de fase, la relación entre entalpía y temperatura es lineal, y se corresponde con el calor específico del material, con lo que no hay que actualizar ningún elemento de la matriz.

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (cT + \Delta H) = \nabla (k \nabla T) \tag{2.59}$$

Reordenando esta ecuación se puede reescribir como:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k \nabla T) + S \tag{2.60}$$

siendo

$$S = -\rho \frac{\partial \Delta H}{\partial t} \tag{2.61}$$

Se ha reconvertido la ecuación incluyendo el término latente  $\Delta H$  como una fuente variable en el tiempo. De esta forma se consigue aislar la no linealidad de la ecuación de forma que se pueda tratar de manera eficiente.

Con anterioridad a este trabajo, Furzeland [113] había propuesto una aproximación similar, reordenando los términos de la ecuación para reducir el número de actualizaciones de matrices durante el cambio de fase. Aún así, el método propuesto requería una implementación compleja, al requerir una doble iteración en cada intervalo temporal.

**2.6.3.3.3. Esquema de Crank-Nicolson** Para obtener el esquema de Crank-Nicolson, es necesario sustituir el valor de  $\gamma$  por  $1/2$  en la ecuación 2.31:

$$\left[ k^+ \frac{T_{i+1}^{n+1/2} - T_i^{n+1/2}}{\Delta x} \right] \Delta t - \left[ k^- \frac{T_i^{n+1/2} - T_{i-1}^{n+1/2}}{\Delta x} \right] \Delta t = \rho \Delta x [h_i^{n+1} - h_i^n] \tag{2.62}$$

Como no es posible obtener los datos de temperatura para el estado intermedio  $n + 1/2$ , se obtiene como media de los estados  $n$  y  $n + 1$ :

$$\begin{aligned} \rho \Delta x [h_i^{n+1} - h_i^n] &= \frac{1}{2} \left[ k^+ \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{\Delta x} + k^+ \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x} \right] \Delta t - \\ &- \frac{1}{2} \left[ k^- \frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{\Delta x} + k^- \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta x} \right] \Delta t \end{aligned} \tag{2.63}$$



Como ya se ha comentado con anterioridad, este método es marginalmente estable, y se beneficia de una menor orden de error, que es de  $O(\Delta t^2 + \Delta x^2)$ . Esto permite recurrir a un espaciado temporal mayor, reduciendo el coste computacional de la modelización.

Asgarpour y Bayazitoglu [148] optan por un esquema de diferenciación temporal basado en Crank-Nicolson, por obtener una aproximación temporal de segundo orden de exactitud. Este método lo emplean en el cálculo de la transferencia de calor radial y axial en un intercambiador de carcasa-tubos, con el PCM por el lado de carcasa, obteniendo buenos resultados.

Vyshak et al [149] también emplearon este esquema para comparar los tiempos de fusión de diferentes formas de contenedores. Comparando los resultados con datos experimentales obtuvieron un buen ajuste.

**2.6.3.3.4. Esquemas a tres niveles** A diferencia de los métodos a dos niveles, que usan diferencias laterales a la hora de obtener la diferenciación, los esquemas a tres niveles hacen uso de la diferencia central, de manera que en cada intervalo temporal es necesario emplear dos datos temporales anteriores, en lugar de uno único.

Bonacina et al. [127] aplicaron un esquema de resolución en diferencias finitas implícito a tres niveles<sup>32</sup>, que es incondicionalmente estable y convergente, y que proporciona a los resultados una exactitud importante comparada con resoluciones analíticas<sup>33</sup>. Este método de discretización temporal ya fue propuesto por Lees en 1966 [150], quien demostró su convergencia incondicional.

Partiendo de la ecuación de difusión de calor con calor específico efectivo (ecuación 2.43):

$$\rho c_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k \nabla T)$$

Los autores aplican operadores diferenciales centrados, para obtener, en el caso unidimensional:

$$\rho c_{eff} (T_i^m) \mu \delta_t (T_i^m) = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \mu \delta_x^2 [k (T_i^m) \mu \delta_x (T_i^m)] \quad (2.64)$$

siendo  $\mu \delta$  el operador diferencial centrado, y su subíndice la dimensión a la que se aplica.

Al operar la ecuación 2.64 se obtiene:

$$\begin{aligned} \rho c_{eff} (T_i^m) (T_i^{m+1} - T_i^{m-1}) = \\ = \frac{2}{3} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \left\{ k^+ [(T_{i+1}^{m+1} - T_i^{m+1}) + (T_{i+1}^m - T_i^m) + (T_{i+1}^{m-1} - T_i^{m-1})] - \right. \\ \left. - k^- [(T_i^{m+1} - T_{i-1}^{m+1}) + (T_i^m - T_{i-1}^m) + (T_i^{m-1} - T_{i-1}^{m-1})] \right\} \end{aligned} \quad (2.65)$$

<sup>32</sup>Aplican la diferencia central para la derivada temporal, y diferencias distribuidas en la segunda derivada espacial

<sup>33</sup>Los resultados de los casos planteados y comparados con resoluciones exactas presentan un error inferior al 1 %

siendo

$$k^+ = k \left( T_{i+\frac{1}{2}}^m \right) \cong k \left( \frac{T_{i+1}^m + T_i^m}{2} \right) \quad (2.66a)$$

$$k^- = k \left( T_{i-\frac{1}{2}}^m \right) \cong k \left( \frac{T_i^m + T_{i-1}^m}{2} \right) \quad (2.66b)$$

Una ventaja importante del método es que los parámetros se calculan en el intervalo de tiempo intermedio, con lo que ya disponemos de sus valores a la hora de calcular el nuevo campo de temperaturas<sup>34</sup>. Se obtiene de esta forma un sistema de ecuaciones lineales tri-diagonal que evita la necesidad de realizar iteraciones para calcular las propiedades en cada nuevo instante.

Para reducir posibles oscilaciones, una vez obtenida la nueva temperatura, se debe corregir la del estado anterior de la siguiente forma [101]:

$$T_{corr}^m = \frac{1}{3} \{ T^{m+1} + T^m + T^{m-1} \} \quad (2.67)$$

Los autores ya demostraron con anterioridad [127] la consistencia, estabilidad y convergencia de este método para el cálculo de la transferencia de calor en medios no lineales. Propusieron además un método para la inclusión de condiciones de frontera de 2ª y 3ª especie, mediante el cálculo de una conductividad equivalente en los elementos de frontera que incluyera la transferencia de calor en la misma.

Este método de todos modos cuenta con el inconveniente de que en el estado inicial es necesario disponer de dos valores iniciales para inicializar el algoritmo, o en su caso, usar un método de nivel 2 para obtener ese dato inicial adicional<sup>35</sup>.

Pham [151] propone una modificación de este método para evitar el salto del cambio de fase que puede suceder al evaluar el calor efectivo en el único instante de tiempo  $T^m$ . Para ello la calculan como una aproximación del mismo orden que el método de Lees, esto es, de 2º orden.

La aproximación de 2º orden del calor efectivo sería:

$$c_i^{m,\diamond} = \frac{\Delta H^\diamond}{T^\diamond - T_i^{m-1}} \quad (2.68)$$

siendo

$$\Delta H^\diamond = \frac{2\Delta t}{(\Delta x)^2} \{ k_+ (T_{i+1}^m - T_i^m) - k_- (T_{i-1}^m - T_i^m) \} \quad (2.69)$$

$$T^\diamond = f_T \{ f_H (T_i^{m-1}) + \Delta H^\diamond \} \quad (2.70)$$

siendo  $f_H$  y  $f_T$  las funciones para obtener la entalpía de la temperatura y viceversa. De es-

<sup>34</sup>Las propiedades del material se calculan en el instante m, y son por lo tanto conocidas a la hora de obtener la nueva temperatura m+1

<sup>35</sup>Por ejemplo, emplear el método de Crank-Nicolson



ta forma se puede calcular el calor efectivo con una aproximación del mismo orden que el algoritmo empleado, usando en todo momento datos conocidos de estados anteriores.

Como última preocupación para evitar el salto del calor latente, proponen corregir la nueva temperatura obtenida de la siguiente forma:

$$T_i^{m+1,corr} = f_T \{ f_H(T_i^m) + c_i^{m,\diamond} (T_i^{m+1} - T_i^{m-1}) \} \quad (2.71)$$

Si observamos las expresiones obtenidas, este método fusiona la condición de entalpía y la de calor específico efectivo en una única expresión incondicionalmente estable, con aproximación de 2º orden. El autor la comparó con otros métodos, incluidos el método explícito, el implícito y soluciones analíticas conocidas, demostrando menores desviaciones que los otros métodos incluso para intervalos de tiempo relativamente grandes. Este método cuenta con la ventaja adicional el poder usarse con otros algoritmos a tres niveles, como el algoritmo de Dupont que se va a explicar con posterioridad. El propio autor emplea con posterioridad [152] el mismo método con el esquema de Crank-Nicolson, y obtiene los mismos resultados en cuanto exactitud, pero con una mayor velocidad de cálculo, a costa de una mayor complejidad en la programación por requerir de iteraciones en cada intervalo temporal.

De todos modos, este método se basa en el hecho de poder calcular de manera explícita la ganancia de energía de cada nodo, algo posible en los esquemas en diferencias finitas, pero no en los esquemas de elementos finitos, donde existe mutua dependencia entre nodos. En un trabajo posterior [153] Pham demuestra que el empleo de matrices de inercia con parámetros de conjunto sobre elementos finitos elimina esta dependencia entre nodos y permite la aplicación del mismo método a los esquemas de elementos finitos.

Comini et al. [154] aplican también este mismo esquema para el empleo con elementos finitos, definiéndolo como un método de resolución predictor-corrector.

Dalhuijsen y Segal [111] comparan distintos esquemas de discretización temporal como son el método implícito de Euler, el algoritmo de Lees y el algoritmo de Dupont. El algoritmo de Lees es el método a tres niveles usado entre otros por Del Guidice [101], Comini [100] y Morgan [130]. El algoritmo de Dupont es otro método a tres niveles, que adopta la siguiente forma:

$$\left( \mathbf{C} + \frac{3}{4} \Delta t \mathbf{K} \right) \mathbf{T}^{n+1} = \mathbf{C} \mathbf{T}^n - \frac{1}{4} \Delta t \mathbf{K} \mathbf{T}^{n-1} + \Delta t \mathbf{F} \quad (2.72)$$

con las propiedades calculadas en el instante

$$t = \frac{3}{2} t_n - \frac{1}{2} t_{n-1} \quad (2.73)$$

o en el instante

$$t = t_n \quad (2.74)$$

Según los autores, el esquema de Dupont es claramente superior al esquema de discretización de Lees. Y respecto a las dos posibilidades de evaluación de propiedades del esquema de Dupont, la que presenta mejores resultados es la ecuación 2.73. Este resultado coinci-

de con un trabajo previo de Hogge [155], y otro de Thomas et al. [102], según los cuales el esquema de Dupont tiene un comportamiento excelente para los análisis a corto plazo, pero mantiene un buen resultado en los análisis a largo plazo.

Majumdar y Saidbakhsh [156] usan otro esquema a tres niveles, el esquema de Frankel-Dufort, para realizar simulaciones en un sistema de almacenamiento aire-PCM. Para iniciar el algoritmo, en las dos primeras iteraciones en este caso emplean el esquema implícito directamente.

**2.6.3.3.5. Esquemas mixtos** Algunos autores han usado esquemas mixtos en los que se mezclan varias aproximaciones diferentes.

En 1964 Saul'yev [142] propone un método de discretización que pese a no ser en sí explícito, se convierte en tal a la hora de implementarlo. La propuesta de discretización se basa en aplicar para cada elemento, el esquema explícito a un lado, y el implícito al otro. De esta aplicación, resulta:

$$\rho \frac{h_i^{n+1} - h_i^n}{\Delta t} = \begin{cases} \frac{k^+(T_{i+1}^n - T_i^n) - k^-(T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1})}{\Delta x^2} & i = 1 \rightarrow N \\ \frac{k^+(T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}) - k^-(T_i^n - T_{i-1}^n)}{\Delta x^2} & i = 1 \leftarrow N \end{cases} \quad (2.75)$$

El algoritmo se muestra como explícito al usar una representación de la ecuación de difusión en función de la temperatura:

$$\rho c \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \begin{cases} \frac{k^+(T_{i+1}^n - T_i^n) - k^-(T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1})}{\Delta x^2} & i = 1 \rightarrow N \\ \frac{k^+(T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}) - k^-(T_i^n - T_{i-1}^n)}{\Delta x^2} & i = 1 \leftarrow N \end{cases} \quad (2.76)$$

En función de la dirección de avance del algoritmo, para el cálculo de cada nuevo elemento se emplearán los valores pasados de los elementos no calculados, y los valores nuevos de los ya calculados, con lo que el algoritmo se convierte en explícito. Este método presenta la gran ventaja de ser incondicionalmente estable.

El problema que presenta el método así expuesto es un menor grado de exactitud espacial que el resto de métodos. De todos modos, esto se puede solucionar con facilidad fusionando esta formulación con la correspondiente al método explícito, y usando de manera alternada cada una de las direcciones del algoritmo, de la siguiente forma:

$$T_i^{n+1} = \frac{\Delta F_o}{1 + \Delta F_o \psi} \left[ \psi T_{i-iswp}^{n+1} + (1 - \psi) T_{i-iswp}^n - \left( 2 - \psi - \frac{1}{\Delta F_o} \right) T_i^n + T_{i+iswp}^n \right] \quad (2.77)$$

siendo *iswp* el indicador que provoca el cambio de sentido del algoritmo. Adopta el valor de 1 en los instantes temporales impares, y -1 en los instantes pares. El método así propuesto



presenta estabilidad condicionada, pero ajustable mediante el factor de mezcla de algoritmos  $\psi$ . El criterio de estabilidad en este caso será:

$$\Delta Fo = \frac{1}{2(1 - \psi)} \quad (2.78)$$

El orden de exactitud de este algoritmo pasa a ser  $O(\Delta t + \psi \Delta x + \Delta x^2)$

Este método fue usado por Tavakoli y Davami [16], que además lo generalizaron para su uso en varias dimensiones.

Wood et al [157] proponen en 1981 utilizar un esquema de resolución en diferencias finitas mixto denominado de salto par-impar<sup>36</sup>. Básicamente se trata de definir un índice como suma del número de elemento y del número de instante de tiempo. Se emplea en ese momento el esquema de diferenciación explícito para los elementos de índice par, y el implícito para los de índice impar. De esta forma se evita tener que resolver sistemas de ecuaciones para el campo de temperaturas de cada intervalo como ocurre en un esquema implícito, y al mismo tiempo desaparecen los problemas de estabilidad del esquema explícito.

El mismo Wood propone en 1986 [158] usar el mismo esquema de salto para resolver un problema de solidificación tridimensional. El método presenta resultados adecuados, pero su coste computacional aumenta en gran medida al reducir el tamaño de la red de discretización, y con redes amplias aparecen problemas de oscilación de la temperatura en las proximidades de la interfase.

#### 2.6.3.4. Esquemas de iteración

Como ya se ha comentado con antelación, en muchos casos es necesario recurrir a esquemas de resolución iterativos para obtener el campo de temperaturas y entalpías para cada intervalo temporal, debido al uso de métodos implícitos. Se va a analizar a continuación los esquemas más empleados, así como normas genéricas para mejorar los procesos iterativos.

Schneider y Raw [105, 106] proponen aplicar dos reglas sencillas que reducen el costo de las iteraciones a realizar en la resolución de problemas implícitos:

- Obligar a cada elemento pase por cada una de las transiciones (sólido-mezcla-líquido) obligando a que en cada iteración cada elemento sólo pueda experimentar una transición de estado. Esta norma es importante en las formulaciones de calor específico efectivo, para evitar saltos de fase sin contabilizar con el efecto del calor latente, como se ha comentado con anterioridad, y es por la tanto un problema inherente a ese tipo de solución.
- Si los elementos que rodean al elemento de estudio no han sufrido cambio de fase, el propio elemento también se mantendrá invariante con respecto a su fase. Esta norma es lógica si tenemos en cuenta que el cambio de fase es un proceso de difusión, que se transmite de nodo en nodo.

<sup>36</sup>Odd-even hopscotch en el original

Implementando estas dos sencillas normas en el método de resolución se consigue reducir el esfuerzo de cálculo hasta en un factor de 47 según los autores, debido a la drástica reducción del número de iteraciones a realizar.

**2.6.3.4.1. Gauss-Seidel** Meyer [159] utiliza el método de Gauss-Seidel para resolver el problema de cambio de fase. A pesar de que el método de Gauss-Seidel está planteado para la resolución de problemas lineales, el autor demuestra que sirve también para los problemas de cambio de fase siempre que la relación entre entalpía y temperatura se pueda expresar en forma de una sucesión de tramos lineales continuos. Además de eso, propone como una buena solución inicial para comenzar el proceso iterativo la solución del problema explícito. Shamsundar et al. [124] también emplean el método de Gauss-Seidel en la resolución de las iteraciones de entalpía y temperatura.

Este método se complica al calcular la transferencia de calor de materiales puros, puesto que la rápida variación de calor efectivo que se produce durante el cambio de fase dificulta la convergencia del algoritmo [147].

Shamsundar et al. [124] se decidieron por el método iterativo de Gauss-Seidel porque por un lado requería poca memoria<sup>37</sup>, pero sobre todo porque permite realizar simultáneamente la iteración para el campo de temperaturas y las iteraciones para hallar la relación entre entalpía y temperatura. Meyer [159] ya había demostrado en 1973 la convergencia del método de Gauss-Seidel para el cálculo de los problemas de cambio de fase.

La aplicación de este método de resolución se facilita en gran medida con una reordenación de los elementos de las ecuaciones.

Como ya se ha comentado, la discontinuidad que presenta la entalpía durante el cambio de fase en el caso de materiales puros dificulta en gran medida la convergencia del método de iteración de Gauss-Seidel en las zonas de interfase. Una solución a este problema la dio White [160], proponiendo un método de Gauss-Seidel modificado, similar al método de Jacobi. En este caso, en lugar de dividir la matriz de coeficientes en dos matrices, una triangular inferior y otra estrictamente superior, como hace el método de Gauss-Seidel normal, divide la matriz en tres componentes: Una diagonal, una estrictamente inferior, y otra estrictamente superior. Esto junto con un cambio de variable integral para la temperatura<sup>38</sup> permite la convergencia incluso en los casos de materiales puros.

Voller [147] propone otra modificación, para resolver el problema de la dependencia de los coeficientes de iteración de la fase en la que se encuentra cada elemento. Para empezar separa las componentes sensible y latente, reescribiendo la ecuación de difusión de calor como:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k \nabla T) + S \tag{2.79}$$

siendo

$$S = -\rho \frac{\partial \Delta H}{\partial t} \tag{2.80}$$

<sup>37</sup>La memoria necesaria para la resolución de un método es un problema menor a fecha de hoy

<sup>38</sup>Cambio de variable dependiente de Kirchoff:  $F(T) = \int_0^T k(\bar{T}) d\bar{T}$



De esta forma se consigue aislar la no linealidad de la ecuación de forma que se pueda tratar de manera eficiente. La representación general en diferencias finitas de esta ecuación sería:

$$cT_i^{n+1} = cT_i^n + \Delta t (1 - \gamma) \frac{k}{\rho \Delta x^2} [T_{i-1}^n - 2T_i^n + T_{i+1}^n] + \Delta t \gamma \frac{k}{\rho \Delta x^2} [T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1}] + S_i^{n+1} \quad (2.81)$$

siendo

$$S_i^{n+1} = \lambda_i^{n+1} - \lambda_i^n \quad (2.82)$$

valor que sólo va a ser no nulo en los momentos en los que el elemento esté sufriendo un cambio de fase.

Sobre esta ecuación de diferencias se puede aplicar ahora un esquema de resolución iterativo tipo Gauss-Seidel, sin que los coeficientes de iteración dependan del tipo de fase en la que se encuentre el elemento. Sólo dependerá en aquellos elementos en los que se esté produciendo el cambio de fase, y sólo será necesario actualizar coeficientes en dichos elementos. Se tiene de esta forma un método de resolución mucho más eficiente que los anteriores.

Posteriormente Voller [161] propone unir este algoritmo con su propuesta anterior [117] de usar una red espacial fija con un espaciado temporal variable de manera que el frente de cambio de fase coincida en todo momento con la posición de un nodo, saltando así la interfase de nodo en nodo para cada intervalo temporal. De esta forma el término fuente  $S$  es conocido en cada nuevo intervalo de tiempo y el esquema matricial tridiagonal que se obtiene para la obtención de la duración de cada intervalo temporal es fácilmente resoluble, mejorando además la exactitud de las soluciones.

**2.6.3.4.2. Newton-Raphson** Otra manera de resolver el sistema de ecuaciones es a través del método de iteración de Newton-Raphson. Longworth [162] lo aplicó usando la entalpía como variable principal. Parte de nuevo de la resolución del esquema explícito como iteración inicial, corrigiendo posteriormente con el Jacobiano.

Asgarpour y Bayazitoglu [148] optan por un esquema de diferenciación temporal basado en Crank-Nicolson, por obtener una aproximación temporal de segundo orden. A la hora de resolver cada instante de tiempo usan el método de Newton-Raphson para las iteraciones. Este método lo emplean en el cálculo de la transferencia de calor radial y axial en un intercambiador de carcasa-tubos, con el PCM por el lado de carcasa, obteniendo buenos resultados.

**2.6.3.4.3. Métodos modificados** En los métodos anteriores [159, 124, 162] los coeficientes que se deben emplear en cada iteración varían en función del estado de fase en el que se encuentre el elemento, con lo que han de ser recalculados continuamente. Esto se traduce en métodos que son poco eficientes para calcular los procesos de cambio de fase según Voller

[147].

Una opción adicional a considerar serían los métodos de cuasi-Newton, cuya aplicación a sistemas de ecuaciones no lineales fue analizado en 1981 por Geradin et al [163]. Soria y Pegon [164] estudiaron su aplicación concreta a los problemas de transferencia de calor no lineales.

Furzeland [113] proponen un método de iteración en el que no se requiere comprobar en continuo el estado en el que se encuentra cada uno de los elementos. Para ello reordenan la ecuación en diferencias finitas de la siguiente forma:

$$h_i^{n+1} + 2\gamma \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \frac{k}{\rho} T_i^{n+1} = b_i \quad (2.83)$$

siendo

$$b_i = h_i^n + (1 - \gamma) \frac{k\Delta t}{\rho\Delta x^2} [T_{i-1}^n - 2T_i^n + T_{i+1}^n] + \gamma \frac{k\Delta t}{\rho\Delta x^2} [T_{i-1}^{n+1} + T_{i+1}^{n+1}] \quad (2.84)$$

Se puede considerar ahora la ecuación 2.83 como un esquema de iteración puntual. Se puede así aplicar un esquema iterativo mediante el método de Newton, en el que para cada iteración se considera  $b_i$  constante<sup>39</sup>.

#### 2.6.4. Métodos indirectos

Estos métodos se denominan indirectos porque no analizan directamente las ecuaciones fundamentales que rigen el problema, sino que buscan relaciones entre las variables dependientes e independientes, y las intentan expresar mediante ecuaciones matemáticas, sin tener a priori en consideración las propiedades del sistema. Se trata de modelos que podríamos denominar “de caja negra”, en los que lo único que interesa es la relación entre las entradas (variables independientes) y salidas (variables dependientes) al sistema.

Existen muchos métodos de este tipo desarrollados, sobre todo para sistemas lineales e invariantes, basados en métodos de transformación integral. Relacionados con el campo de la transferencia de calor a través de cerramientos, el método de los factores de respuesta, y el método de las funciones de transferencia de conducción pertenecen a este tipo de métodos.

El problema al que nos enfrentamos, en cambio, no es ni lineal, ni invariante. La relación entre las variables temperatura y entalpía presentes en la ecuación de difusión de calor (ec. 2.2) es fuertemente no lineal, y además el comportamiento del sistema es diferente en función de si se está calentando o enfriando. Esto obliga a plantearse otros métodos de cálculo que sirvan para sistemas que no presentan un comportamiento lineal.

En las últimas décadas, el desarrollo de la ciencia computacional y la inteligencia artificial, ha creado una serie de métodos de cálculo y simulación muy potentes, que son capaces de obtener relaciones complejas entre variables mediante la conjunción de elementos relativamente sencillos. Este tipo de métodos son muy adecuados para los casos de sistemas complejos y no lineales, por su sencillez, versatilidad, rapidez de cálculo y escalabilidad. Se engloban en

<sup>39</sup> $b_i$  es independiente de  $T_i^{n+1}$



general dentro de la categoría conocida como "Aprendizaje Automático".

En todos ellos, el proceso a seguir para emplearlos es muy parecido. Se parte de una primera etapa en la que se plantea el tipo de sistema que se va a emplear, y se realizan una serie de ensayos para obtener datos experimentales. En la segunda etapa, se ajustan los parámetros internos del método a usar, en un proceso que se conoce normalmente como aprendizaje. Se trata de un proceso iterativo en el que se van ajustando los coeficientes hasta conseguir reducir el error en función a los datos experimentales. Una vez terminado el proceso de aprendizaje, el algoritmo se encuentra preparado para ser utilizado.

La parte negativa de este tipo de métodos es que debe partir de datos experimentales reales, o bien de datos provistos por otro modelo suficientemente validado, lo que no siempre es posible de obtener.

Por el contrario, al partir de datos experimentales medidos bajo las condiciones que resulten de más interés para el problema estudiado, estos métodos no tienen que realizar suposiciones sobre las simplificaciones que se pueden hacer sin perder exactitud en los resultados, y prescindir de los valores no necesarios. Así, en un problema de transferencia de calor en materiales de cambio de fase, el propio método ajustará sus parámetros internos para tener en cuenta la convección de la fase líquida, sólo cuando esta sea importante, y sin información adicional sobre el funcionamiento del material en fase líquida, partiendo en exclusiva de los valores experimentales. Al mismo tiempo, estos métodos suelen ser muy robustos ante las pequeñas desviaciones de lectura en la captación de los valores experimentales, siempre que estos errores carezcan de sesgo.

Los métodos más utilizados en la resolución de problemas de transferencia de calor son las redes neuronales y los algoritmos genéticos, aunque también se han realizado trabajos basados en otros métodos. Se van a describir a continuación los métodos más usados.

#### 2.6.4.1. Regresión lineal

La regresión lineal es tal vez el más sencillo de los modelos indirectos. En este caso, se busca una relación lineal que ligue las variables dependientes e independientes entre sí, minimizando el error entre los datos experimentales y los valores predichos por el modelo. Lo más habitual es representar el error en forma de la suma del cuadrado de la diferencia entre el valor medido y el valor estimado. Como el método se basa en reducir al mínimo el error entre los valores experimentales y los obtenidos por la relación lineal, este método también se conoce método de los mínimos cuadrados.

Por lo tanto, aplicando este método se busca obtener una relación entre los flujos de calor y las temperaturas de la forma:

$$Q = AT + B \quad (2.85)$$

Este método da buenos resultados cuando la relación entre las variables analizadas es lineal, o se acerca a la linealidad. En el caso de estudio, ya se ha comentado con anterioridad que la relación entre las variables temperatura y flujo de calor es fuertemente no lineal, además

de variante, con lo que este método no sería el más adecuado para este caso.

#### 2.6.4.2. Máquina de Vectores de Soporte SVM

Las Máquinas de Vectores de Soporte, más conocidas como método SVM<sup>40</sup>, es un conjunto de métodos de aprendizaje supervisado que se suele emplear tanto para los problemas de clasificación, como los de regresión. Esta familia de algoritmos se basa en la definición de un hiperplano que maximice una función de beneficio. En el caso de un problema de clasificación, por ejemplo, el método SVM busca encontrar una frontera entre categorías que se encuentre siempre a la máxima distancia de los puntos a separar.

Los métodos SVM se encuentran en la categoría de los métodos lineales. Esto los haría no adecuados para su uso en el estudio de problemas no lineales, y por lo tanto, restringiría su uso de manera importante. Para ampliar su rango de aplicación, hace uso de las funciones de kernel. Estas realizan una transformación de variables a un nuevo espacio de más dimensiones, reordenando los elementos de manera que puedan ser tratados como problemas lineales. Los funciones de kernel más habituales son las funciones polinomiales, los perceptrones<sup>41</sup>, funciones sigmoideas, y función de base radial gaussiana.

Varol et al [165] emplearon este método para evaluar el comportamiento de un colector solar plano con PCMs. En concreto, compararon el empleo del método SVM con las redes neuronales y con sistemas difusos de interferencias, demostrando que para este caso el método SVM obtenía mejores resultados. Kovacevic et al [166] emplearon la función de base radial gaussiana para resolver el problema de Stefan mediante el método de entalpía, y lo aplican posteriormente al caso del llenado de un tanque de almacenamiento con PCM. Posteriormente, Vertnik y Sarler emplean un método similar para resolver el problema del cambio de fase en presencia de convección [167].

#### 2.6.4.3. Algoritmos genéticos

Se trata de un método de búsqueda heurística que se basa en imitar la forma en la que los seres vivos han ido evolucionando, replicando procesos como la herencia, mutación, selección e hibridación. Es un tipo de método incluido en los algoritmos evolucionarios, y se ha utilizado sobre todo para la optimización de procesos.

En este método, se asignan unos parámetros a una serie de ecuaciones (p.e. un sistema de polinomios), y se hace evolucionar hasta optimizar el valor de una función de mérito. En el caso de la creación de modelos para la simulación, la función de mérito podría ser el error del modelo, frente a los datos experimentales conocidos. El conjunto de parámetros, se suele denominar genoma o cromosoma, y se comparan varios de ellos para elegir los que presentan mejor comportamiento, en busca del óptimo. Los mecanismos de evolución son los siguientes:

<sup>40</sup>Por sus iniciales en inglés, Support Vector Machines

<sup>41</sup>Posteriormente se hablará de los perceptrones, al tratar las redes neuronales. En este caso, aunque se utilice una función similar, los métodos de resolución, y el enfoque del problema son muy diferentes, con los que se corresponde con problemas diferentes



- **Inicialización:** Normalmente se parte de conjuntos de parámetros elegidos de forma aleatoria. El número de cromosomas de partida depende de la complejidad del problema y del número total de parámetros a optimizar, pero puede llegar a varios centenares. Al conjunto de cromosomas se le suele denominar población.
- **Selección:** Del total de población, se selecciona un porcentaje, siendo estos los que presentan mejor comportamiento frente a la función de mérito. Los cromosomas seleccionados son los que pasarán a la siguiente etapa de reproducción, para dar una nueva generación de cromosomas.
- **Reproducción:** En esta etapa se crea una nueva generación de cromosomas que posteriormente volverán a pasar por el proceso de selección. Los métodos más utilizados para crear la nueva generación son los siguientes:
  - **Hibridación:** Se cogen dos cromosomas de la generación anterior, y se le intercambian entre ambos una parte de sus componentes
  - **Mutación:** Se parte de uno de los cromosomas de la generación anterior, y se le altera de forma aleatoria alguno de sus componentes
- **Finalización:** Los procesos de selección y reproducción se repiten hasta que la función de mérito encuentra un cromosoma que la optimice

Como ya se ha comentado, este tipo de métodos se emplean sobre todo para la optimización de procesos, haciendo evolucionar los valores de las variables hasta obtener el óptimo en función de la función de mérito adecuada. De todos modos, también se pueden emplear para ajustar los coeficientes de desarrollos en serie polinomiales, para el ajuste de funciones. En este caso, la función de mérito más habitual es la suma de cuadrados de errores, intentando su minimización.

Como ejemplo, Kanesan et al. [168] emplearon los algoritmos genéticos junto con las redes neuronales, para optimizar unos disipadores de calor para aparatos electrónicos. Najafian et al [169] han empleado también un método similar para optimizar la cantidad de PCM necesario para desplazar los picos de consumo de energía de los tanques de almacenamiento de agua caliente sanitaria.

#### **2.6.4.4. Redes neuronales**

De forma similar a como los algoritmos genéticos replican la evolución de las especies, las redes neuronales replican otro comportamiento biológico: el funcionamiento de las neuronas cerebrales. Las neuronas biológicas son unas células altamente interconectadas<sup>42</sup>, que son capaces de realizar operaciones complejas en su conjunto, a pesar de que cada una de las células en sí es muy sencilla y realiza sólo operaciones básicas.

<sup>42</sup>Se estima que cada neurona puede recibir estímulos de otras 10,000 neuronas [170]

Siguiendo esa idea, las redes neuronales son una red interconectada de neuronas artificiales, cada una de las cuales realiza una operación matemática sencilla. Se trata de un método de tipo “caja negra”, que imita el comportamiento de un sistema sin requerir de información detallada de la composición del mismo. Las redes neuronales son capaces de manejar sistemas grandes y complejos, con muchos parámetros interrelacionados, ignorando el exceso de datos de escasa importancia, y centrándose en las variables más importantes. En la figura 2.9 se muestra una neurona tipo.

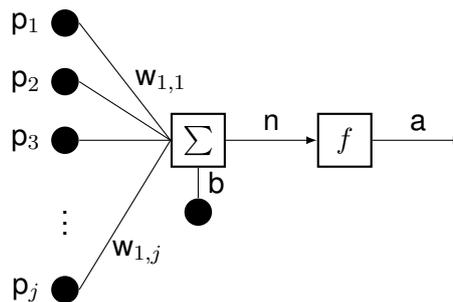


Figura 2.9: Neurona de entradas múltiples

A cada neurona llegan las señales de otras neuronas,  $p_i$ , que son multiplicadas cada una de ellas por un valor diferente  $w_{1,j}$ . A estos valores se les denomina peso. Todas las señales de entrada multiplicadas por los correspondientes pesos son sumadas, y se les añade además un valor adicional  $b$ , que se conoce como bias o sesgo. Este es el valor final de entrada a la neurona  $n$ , que realiza una operación matemática sobre dicho valor para obtener el resultado de salida  $a$ . La función que emplea cada neurona para calcular la salida se denomina función de activación. La salida de la neurona por lo tanto es el resultado de realizar esta operación:

$$a = f \left( \sum_{j=1}^R w_{1,j} p_j + b \right) \tag{2.86}$$

La función de activación puede ser tanto lineal como no, y se suele elegir en función de la tarea que va a realizar. Por ejemplo, para redes que se utilizan para clasificación o reconocimiento de patrones, se suelen usar funciones de tipo escalón. Para la aproximación de funciones, se usan sigmoides, que permiten aproximar de forma uniforme cualquier función [171], y para las capas finales de salida, funciones lineales. Las principales funciones de activación se pueden observar en la figura 2.10. Por su parte, las funciones representadas en la figura 2.10 se corresponden con las ecuaciones de la tabla 2.3.

Las neuronas se agrupan en capas que se conectan entre sí formando redes de neuronas. Se consigue así un sistema de procesado en paralelo de gran potencia [170]. Un ejemplo de una red de este tipo sería la red que aparece en la figura 2.11. Este tipo de red, en el que las neuronas se agrupan en capas dispuestas en serie, se conoce como perceptrón multicapa, y tiene una gran capacidad para aprender funciones complejas [172].

En el ejemplo de la figura 2.11 es una red con tres capas interconectadas. La primera de las

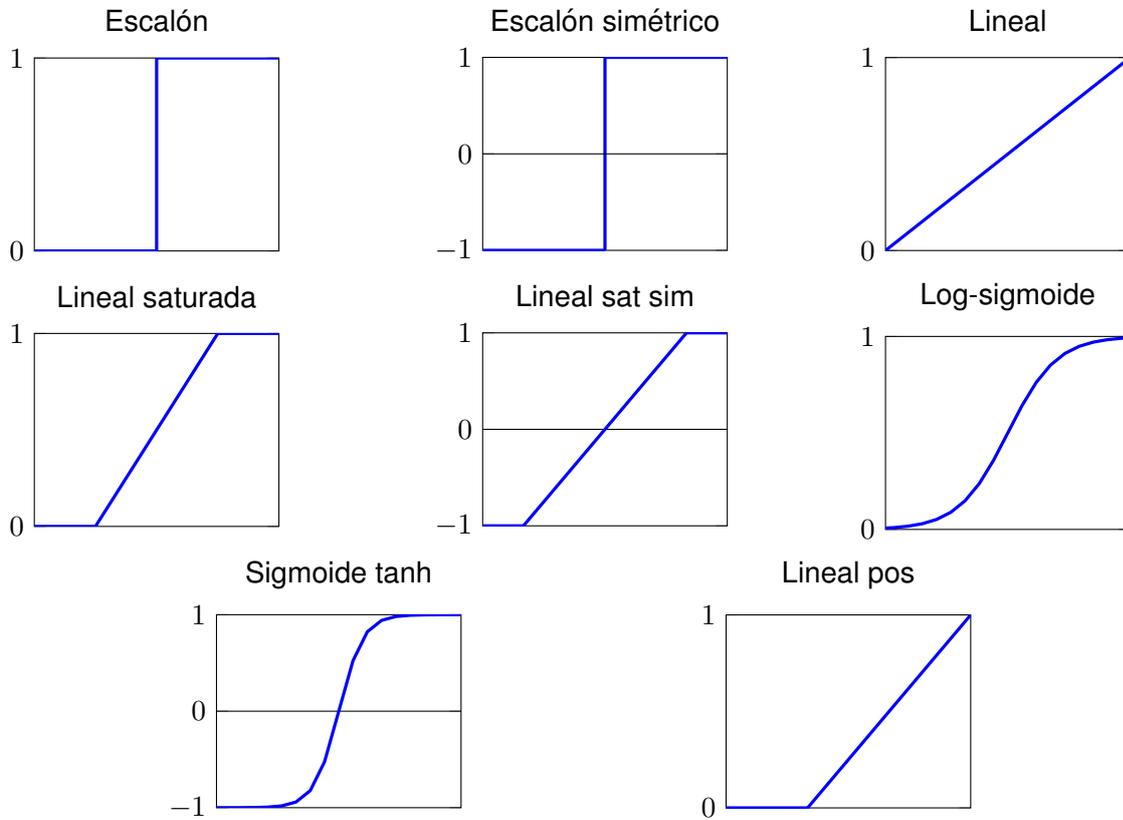


Figura 2.10: Principales funciones de activación de neuronas

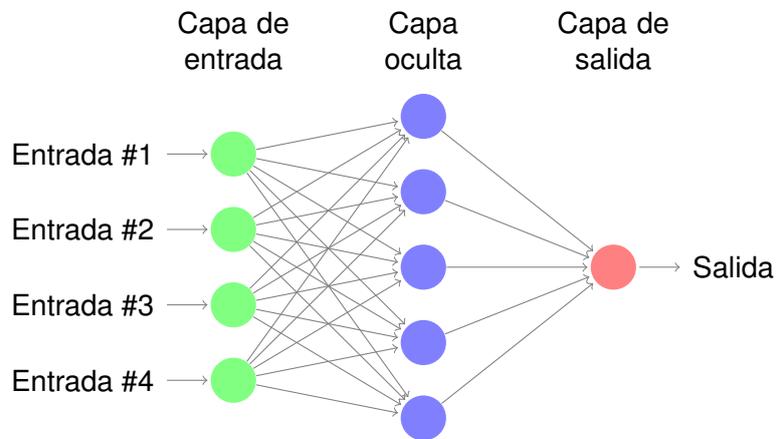


Figura 2.11: Esquema de perceptrón multicapa

Función de activación	Ecuaciones
Escalón	$\begin{cases} a = 0 & n < 0 \\ a = 1 & n \geq 0 \end{cases}$
Escalón simétrico	$\begin{cases} a = -1 & n < 0 \\ a = 1 & n \geq 0 \end{cases}$
Lineal	$a = n$
Lineal saturada	$\begin{cases} a = 0 & n < 0 \\ a = n & 0 \leq n \leq 1 \\ a = 1 & n > 1 \end{cases}$
Lineal saturada simétrica	$\begin{cases} a = -1 & n < 0 \\ a = n & 0 \leq n \leq 1 \\ a = 1 & n > 1 \end{cases}$
Log-sigmoide	$a = \frac{1}{1+e^{-n}}$
Tangente hiperbólica	$a = \tanh(n)$
Lineal positiva	$\begin{cases} a = 0 & n < 0 \\ a = n & n \geq 0 \end{cases}$

Tabla 2.3: Principales funciones de activación de las neuronas



capas se llama capa de entrada, y no realiza ninguna operación. Simplemente toma los datos de partida y los distribuye a la segunda capa. Esta segunda capa se denomina capa oculta. En algunos casos no hay capas ocultas, en otras tipologías de redes puede haber varias capas ocultas, e incluso retroalimentaciones entre capas. En este caso las neuronas sí que realizan alguna operación matemática sobre los datos de entrada. Finalmente la última capa se conoce como capa de salida, y es la que obtiene el resultado final. Las capas de entrada y salida tienen tantas neuronas como datos de entrada (variables independientes) y datos de salida (variables dependientes) tiene el problema en estudio. Con respecto al número de neuronas de la capa oculta, no hay ninguna norma definida al respecto. Los problemas más complejos requieren de mayor número de neuronas, pero un número excesivo puede dar problemas de estabilidad.

**2.6.4.4.1. Principales usos de las redes neuronales** Las redes neuronales se han desarrollado sobre todo en las últimas décadas, y se han aplicado a varios campos, como son la aproximación de funciones, el reconocimiento de patrones, memorias asociativas, o creación de patrones con significado [170]. En lo que se refiere a la transferencia de calor: para la resolución de problemas genéricos de transferencia de calor [173, 174], para la predicción del consumo energético de edificios [172], calentadores solares de agua por termosifón [175, 36], la determinación experimental de los coeficientes CTF [176], de coeficientes de pérdidas de calor de edificios [177, 178], transferencia de calor en fluidos [179], o el análisis de colectores solares planos [180]. Se puede encontrar una buena recopilación de este tipo de trabajos en los artículos de Kalogirou [170, 171].

En lo que respecta a los materiales de cambio de fase, la aplicación de las redes neuronales a su estudio es bastante novedosa. La primera mención es en un trabajo de 2005 por parte de Kanesan et al. [168]. En este trabajo, analizan un sistema de disipación para dispositivos electrónicos basado en PCMs. Parten de un modelo numérico, que utilizan para entrenar la red neuronal, que en este caso se trata de un perceptrón de tres capas, y relacionar los parámetros geométricos con el tiempo de estabilización de temperatura y temperatura máxima de trabajo durante la operación de los dispositivos electrónicos. Como dato curioso, en este trabajo utilizan luego algoritmos genéticos para optimizar espesores de PCM y de aletas, junto con los datos obtenidos de la red neuronal, como ya se ha mencionado en el apartado anterior.

En 2007, Ermis et al [181] utilizan redes neuronales para calcular la cantidad de energía almacenada en un sistema de almacenamiento térmico con PCM. Para entrenar la red usa tanto datos experimentales, como un modelo en volúmenes finitos. Deduce que un perceptrón de tres capas, con 13 neuronas de tipo log-sigmoide en la capa oculta, y una neurona lineal en la salida es una configuración óptima para este sistema.

En 2009, Varol et al [165] usan distintos tipos de métodos de lógica difusa para modelizar el comportamiento de un colector solar con PCM. Entre los métodos que compara, incluye un red neuronal de tipo perceptrón de tres capas. Si bien esta red neuronal no sale bien parada en la comparativa con los otros métodos, hay que decir que los resultados de la misma siguen

siendo aceptables. Además, hay que tener en cuenta que el trabajo no plantea cambiar el número de neuronas de la red para mejorar el ajuste, y el número de neuronas en la capa oculta (tan sólo siete) parece escaso para el sistema analizado.

En 2015, Najafian et al [169] usan las redes neuronales para relacionar los parámetros de diseño de un contenedor de PCM para su empleo en tanques de almacenamiento de agua caliente sanitaria, con el tiempo de descarga del material de cambio de fase. Los parámetros de diseño considerados fueron las dimensiones del contenedor, y el número de contenedores y localización dentro del tanque de agua.

Como se puede observar, la aplicación de redes neuronales para el estudio de sistemas con materiales de cambio de fase parece un campo prometedor, en el que de momento el trabajo es incipiente. El mayor problema para la aplicación de esta metodología para la simulación del comportamiento de los PCM es la necesidad de datos experimentales para entrenar la red neuronal, por lo que de momento se ha limitado su empleo a sistemas de pequeño tamaño.

**2.6.4.4.2. Etapas en la creación de una red neuronal** Igual que sucede con los algoritmos genéticos, el proceso de creación de una red neuronal consta de varias etapas:

- Definición inicial del tipo de red: se define la tipología de red, número de capas, neuronas, y función de activación a emplear en cada neurona. Normalmente las neuronas de una misma capa llevan la misma función de activación.
- Inicialización de la red: con la tipología previamente definida, se asignan unos valores iniciales a los pesos y bias. Suele ser conveniente partir de valores aleatorios y bajos [182].
- Aprendizaje de la red: se usan datos experimentales para ir ajustando los valores de los pesos y bias. Se trata de un proceso iterativo, en el que se comparan los resultados de la red neuronal con los resultados experimentales, y se corrigen los parámetros en función del error obtenido. Este proceso se detiene cuando el error se sitúa por debajo de un valor preestablecido de tolerancia.
- Reajuste de la red: puede ser que durante el proceso de aprendizaje, la red no converja (no se obtengan valores de los pesos y bias que minimicen el error), o presente resultados inestables. En este caso, se retornará al punto inicial, redefiniendo la estructura básica de la red.
- Una vez la red “ha aprendido” el problema que tiene que resolver, está lista para su uso posterior.

**2.6.4.4.3. Consideraciones en el aprendizaje de redes neuronales** La etapa más laboriosa de la preparación de una red neuronal es el aprendizaje o entrenamiento de la misma. Existen bastantes métodos de aprendizaje, la mayoría de ellos basados en el análisis de la relación entre los valores de ajuste y la variación del error, esto es, en el análisis del gradiente



de la función error en función de esos parámetros. En ocasiones, estos métodos se mejoran también con reglas heurísticas, que permiten acelerar el proceso de aprendizaje. Puesto que el proceso de aprendizaje se centra en la modificación del valor de pesos y bias, se puede decir de alguna forma que la red neuronal almacena su memoria en dichos valores, y que por lo tanto está aprendiendo.

El proceso de aprendizaje es crítico para el futuro funcionamiento de la red neuronal. Este tipo de redes son robustas, y poco sensibles al ruido, siempre y cuando no se entrenen demasiado [170]. En caso de que se entrenen demasiado, minimizando el error al mínimo sobre un conjunto de datos determinado, provoca que la red se ajuste completamente a los datos facilitados, y que por lo tanto asimile el ruido como una información real, lo que puede conllevar a una mala generalización [172]. Una mala generalización implica que la red no va a poder simular correctamente situaciones que se alejen ligeramente de los datos de entrenamiento, siendo por lo tanto poco adecuada<sup>43</sup>.

Para evitar este problema, se suele separar el conjunto de datos experimentales en al menos dos subconjuntos, que contengan de alguna forma todos los posibles casos a aprender por la red. La red entonces se entrena con uno de los conjuntos, pero se examina su exactitud con el otro subconjunto, de forma que nos aseguramos que se comporta bien con datos distintos a los que han servido para su entrenamiento.

Los algoritmos de aprendizaje se pueden dividir en dos grandes familias: el aprendizaje supervisado, y el no supervisado. En el aprendizaje supervisado, se alimenta la red con un conjunto de datos experimentales conocidos, y se ajustan los pesos y bias de la misma para que la red sea capaz de calcular el resultado deseado. Es el caso habitual en las redes que deben simular el comportamiento de sistemas complejos. Por su parte, en el aprendizaje no supervisado la red se ajusta a si misma para responder a los nuevos datos de entrada. La red en este caso trata de encontrar relaciones entre los datos para definir automáticamente esquemas de clasificación. Este segundo método no es de aplicación para el trabajo presente, con lo que no se analizará en mayor profundidad.

**2.6.4.4. Métodos de aprendizaje en redes neuronales. Retropropagación** Como ya se ha mencionado con anterioridad, para reflejar comportamientos complejos como los que se dan durante el cambio de fase en un PCM, los mejores resultados se obtienen con los perceptrones multicapa, como el representado en la figura 2.11. El método más habitual para el entrenamiento de redes multicapa es el conocido como método de retropropagación, y es en el que se basan la mayoría de métodos derivados.

En general, buena parte de los algoritmos de entrenamiento de redes se basan en el método de mínimos cuadrados, ajustando los parámetros de la red para minimizar el cuadrado del error del resultado con respecto a los datos experimentales conocidos. Si bien este procedimiento resulta sencillo en las redes de una sola capa, se complica en los casos multicapa.

<sup>43</sup>Por ilustrar esto con un ejemplo, se puede pensar en las redes de reconocimiento de texto. Si a la red le enseñamos por ejemplo la letra "a" con una única gráfica, interiorizará que es la única manera de escribirla, y no la reconocerá al escribirla en cursiva (a), en negrita (**a**), o con otra tipografía (a)

Hay que tener en cuenta que en las redes multicapa, el valor de entrada de cada capa, depende de los pesos y bias de la capa anterior, y por lo tanto se genera una interdependencia entre los parámetros de distintas capas que dificulta en buena medida la aplicación del método de mínimos cuadrados. El algoritmo de retropropagación propone una regla en cadena para ir desenredando las interdependencias que se dan entre cada capa de un perceptrón multicapa, y facilitar en gran medida el entrenamiento de la red. Fue descubierto de manera independiente en 1985 por tres equipos distintos, Rumelhart et al, Parker y Le Cun [182].

Para explicar el algoritmo de retropropagación, se va a retomar la red multicapa ya expuesta con anterioridad y representada en la figura 2.11. Se van a usar superíndices para representar el número de capa, de manera que  $\mathbf{W}^1$  es la matriz de pesos de la capa oculta<sup>44</sup>, y  $\mathbf{W}^2$  la matriz de pesos de la capa de salida. De forma análoga,  $\mathbf{b}^i$  hará referencia al vector de bias de la capa  $i$ , y  $\mathbf{f}^i$  al vector de funciones de la capa  $i$ . Así, se puede expresar de forma matricial las operaciones realizadas por el perceptrón de dos capas mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{a}^2 = \mathbf{f}^2(\mathbf{W}^2 \mathbf{f}^1(\mathbf{W}^1 \mathbf{p} + \mathbf{b}^1) + \mathbf{b}^2) \tag{2.87}$$

Para facilitar la comprensión del método, se va a representar la red de manera abreviada, en la figura 2.12.

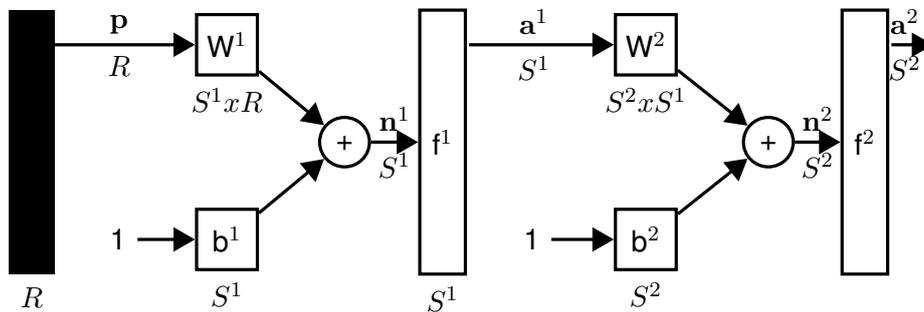


Figura 2.12: Esquema simplificado de un perceptrón de dos capas

Como se puede apreciar de la figura 2.12, la salida de cada capa se convierte en la entrada de la siguiente, siguiendo la siguiente ecuación:

$$\mathbf{a}^{m+1} = \mathbf{f}^{m+1}(\mathbf{W}^{m+1} \mathbf{a}^m + \mathbf{b}^{m+1}) \quad m = 0, 1, \dots, M - 1 \tag{2.88}$$

siendo  $M$  el número de capas de la red neuronal. La entrada a la capa inicial  $\mathbf{a}^0$  coincide con los valores de entrada  $\mathbf{p}$ .

Como ya se ha comentado, el algoritmo de retropropagación es una generalización del método de mínimos cuadrados, adecuado a las redes neuronales multicapa. Por lo tanto, el algoritmo se basa en ir corrigiendo los parámetros de la red neuronal, como son los pesos y bias, para reducir la suma de errores al cuadrado hasta su mínimo. Para realizar este ajuste,

<sup>44</sup>La capa de entrada no es una capa de perceptrones en sí, sólo indica los valores de entrada a la red, y por lo tanto, carece de propiedades pesos y bias



a la red se le proporciona un conjunto de resultados experimentales, que sean representativos del sistema que se quiere modelar, en forma de pares de datos entrada/salida en la forma:

$$\{\mathbf{p}_1, \mathbf{t}_1\}, \{\mathbf{p}_2, \mathbf{t}_2\}, \dots, \{\mathbf{p}_Q, \mathbf{t}_Q\} \quad (2.89)$$

siendo  $p_i$  los valores de entrada y  $t_i$  los valores experimentales de salida. Si el resultado de la red neuronal para cada valor de entrada se denomina  $a_i$ , la función que se debe minimizar sería la media de los errores al cuadrado:

$$F(x) = E[e^2] = E[(t - a)^2] \quad (2.90)$$

siendo  $E$  la media de valores, y  $e$  el error de la red neuronal para cada valor de entrada. Generalizando, y para el caso de redes con varios valores de salida, los valores  $\mathbf{t}$  y  $\mathbf{a}$  serían vectores, con lo que se tendría:

$$F(\mathbf{x}) = E(\mathbf{e}^T \mathbf{e}) = E((\mathbf{t} - \mathbf{a})^T (\mathbf{t} - \mathbf{a})) \quad (2.91)$$

El objetivo es por lo tanto encontrar el mínimo de la función  $F(\mathbf{x})$ , en función de los valores de los pesos y los bias. Se trata por lo tanto de un problema de derivación en múltiples dimensiones. La forma habitual de entender este problema es pensar en una superficie multidimensional, con un mínimo que hay que localizar. Ese mínimo se localizaría avanzando de manera iterativa en la dirección de máxima pendiente, identificada por el gradiente de la función:

$$\bar{\nabla} F(\mathbf{x}) = \bar{\nabla} x E(\mathbf{e}^T \mathbf{e}) \quad (2.92)$$

De todos modos, el gradiente sólo da la dirección en la que hay que realizar el avance, pero no cuánto es necesario avanzar. Ese valor se define a través de un parámetro conocido como ritmo de aprendizaje, y que se denota por  $\alpha$ . Así, el algoritmo de aprendizaje para un perceptrón multicapa se basa en ir buscando el mínimo del error al cuadrado, avanzando una cantidad  $\alpha$  en la dirección de marcada por el gradiente del error al cuadrado.

Aplicando esta definición a las ecuaciones 2.87 y 2.91, se obtendrían las siguientes ecuaciones para la actualización de los pesos y bias:

$$w_{i,j}^m(k+1) = w_{i,j}^m(k) - \alpha \frac{\partial F}{\partial w_{i,j}^m} \quad (2.93)$$

$$b_i^m(k+1) = b_i^m(k) - \alpha \frac{\partial F}{\partial b_i^m} \quad (2.94)$$

El problema que presentan estas ecuaciones, es que el error no es una función explícita de los pesos y bias y de la capa oculta, con lo que calcular la derivada parcial que aparece en las ecuaciones se complica para estas capas. Para la capa oculta, la derivada parcial se puede

obtener a través de la regla de cadena de las derivadas parciales de la siguiente forma:

$$\frac{\partial F}{\partial w_{i,j}^m} = \frac{\partial F}{\partial n_i^m} \times \frac{\partial n_i^m}{\partial w_{i,j}^m} \quad (2.95)$$

$$\frac{\partial F}{\partial b_{i,j}^m} = \frac{\partial F}{\partial n_i^m} \times \frac{\partial n_i^m}{\partial b_{i,j}^m} \quad (2.96)$$

La segunda derivada parcial es sencilla de calcular sin más que tener en cuenta la relación entre la salida de la primera capa  $\mathbf{n}$  y los pesos y bias:

$$n_i^m = \sum w_{i,j}^m a_j^{m-1} + b_i^m \quad (2.97)$$

Con lo que , derivando, se obtendría:

$$\frac{\partial n_i^m}{\partial w_{i,j}^m} = a_j^{m-1} \quad \frac{\partial n_i^m}{\partial b_{i,j}^m} = 1 \quad (2.98)$$

El caso de la primera de las derivadas parciales es algo más complejo de calcular. Por eso, vamos a definir una nueva variable, que llamaremos sensibilidad, y que va a corresponder precisamente con ese primer término:

$$s_i^m = \frac{\partial F}{\partial n_i^m} \quad (2.99)$$

De esta forma, se pueden reescribir las derivadas parciales de la capa oculta de forma abreviada:

$$\frac{\partial F}{\partial w_{i,j}^m} = s_i^m a_j^{m-1} \quad (2.100)$$

$$\frac{\partial F}{\partial b_{i,j}^m} = s_i^m \quad (2.101)$$

Sustituyendo estas expresiones en las ecuaciones de actualización de pesos 2.93 y bias 2.94, se obtienen las siguientes expresiones:

$$w_{i,j}^m(k+1) = w_{i,j}^m(k) - \alpha s_i^m a_j^{m-1} \quad (2.102)$$

$$b_i^m(k+1) = b_i^m(k) - \alpha s_i^m \quad (2.103)$$

expresiones que se pueden reescribir de forma matricial:

$$\mathbf{W}^m(k+1) = \mathbf{W}^m(k) - \alpha \mathbf{s}^m (\mathbf{a}^{m-1})^T \quad (2.104)$$

$$\mathbf{b}^m(k+1) = \mathbf{b}^m(k) - \alpha \mathbf{s}^m \quad (2.105)$$



siendo

$$\mathbf{s}^m = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{n}^m} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial n_1^m} \\ \frac{\partial F}{\partial n_2^m} \\ \vdots \\ \frac{\partial F}{\partial n_{S^m}^m} \end{pmatrix} \quad (2.106)$$

Aún así, todavía no se ha obtenido cómo calcular las sensibilidades  $\mathbf{s}^m$ , que requieren de una nueva aplicación de la regla de cadena. Es de hecho esta segunda aplicación de la regla de cadena la que da la denominación de retropropagación al método de entrenamiento de la red, puesto que crea un algoritmo en el que las sensibilidades de la capa  $m$  se calculan a partir de las de la capa  $m + 1$ . Para ello, se define la siguiente matriz jacobiana:

$$\frac{\partial \mathbf{n}^{m+1}}{\partial \mathbf{n}^m} = \begin{pmatrix} \frac{\partial n_1^{m+1}}{\partial n_1^m} & \frac{\partial n_1^{m+1}}{\partial n_2^m} & \dots & \frac{\partial n_1^{m+1}}{\partial n_{S^m}^m} \\ \frac{\partial n_2^{m+1}}{\partial n_1^m} & \frac{\partial n_2^{m+1}}{\partial n_2^m} & \dots & \frac{\partial n_2^{m+1}}{\partial n_{S^m}^m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial n_{S^{m+1}}^{m+1}}{\partial n_1^m} & \frac{\partial n_{S^{m+1}}^{m+1}}{\partial n_2^m} & \dots & \frac{\partial n_{S^{m+1}}^{m+1}}{\partial n_{S^m}^m} \end{pmatrix} \quad (2.107)$$

Desarrollando el elemento  $i, j$  de la matriz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_i^{m+1}}{\partial n_j^m} &= \frac{\partial \left( \sum_{S^m}^{l=1} w_{i,l}^{m+1} a_l^m + b_i^{m+1} \right)}{\partial n_j^m} \\ &= w_{i,l}^{m+1} \frac{\partial a_j^m}{\partial n_j^m} = w_{i,l}^{m+1} \frac{\partial f^m(n_j^m)}{\partial n_j^m} \end{aligned} \quad (2.108)$$

Se puede reescribir la matriz jacobiana de forma matricial:

$$\frac{\partial \mathbf{n}^{m+1}}{\partial \mathbf{n}^m} = \mathbf{W}^{m+1} \dot{\mathbf{F}}^m(\mathbf{n}^m) \quad (2.109)$$

siendo

$$\dot{\mathbf{F}}^m(\mathbf{n}^m) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f^m(n_1^m)}{\partial n_1^m} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial f^m(n_2^m)}{\partial n_2^m} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f^m(n_{S^m}^m)}{\partial n_{S^m}^m} \end{pmatrix} \quad (2.110)$$

Retomando ahora la definición de la sensibilidad, ecuación 2.106:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{s}^m &= \frac{\partial F}{\partial \mathbf{n}^m} = \left( \frac{\partial \mathbf{n}^{m+1}}{\partial \mathbf{n}^m} \right)^T \frac{\partial F}{\partial \mathbf{n}^{m+1}} = \dot{\mathbf{F}}^m(\mathbf{n}^m)(\mathbf{W}^{m+1})^T \frac{\partial F}{\partial \mathbf{n}^{m+1}} \\
 &= \dot{\mathbf{F}}^m(\mathbf{n}^m)(\mathbf{W}^{m+1})^T \mathbf{s}^{m+1}
 \end{aligned} \tag{2.111}$$

Como se puede observar, se obtiene una ley recurrente para calcular la sensibilidad de cada capa  $m$ , en función de la sensibilidad de la capa siguiente  $m + 1$ . Faltaría por lo tanto obtener la expresión para calcular la sensibilidad de la capa final de salida, capa  $M$ :

$$s_i^M = \frac{\partial F}{\partial n_i^M} = \frac{\partial (\mathbf{t} - \mathbf{a})^T (\mathbf{t} - \mathbf{a})}{\partial n_i^M} = \frac{\partial \sum (t_j - a_j)^2}{\partial n_i^M} = -2(t_i - a_i) \frac{\partial a_i}{\partial n_i^M} \tag{2.112}$$

Puesto que los valores de  $a$  realmente se corresponden con  $f^M(n^M)$ :

$$\frac{\partial a_i}{\partial n_i^M} = \frac{\partial f^M(n^M)}{\partial n_i^M} = \dot{f}^M(n_i^M) \tag{2.113}$$

se puede reescribir la sensibilidad de la última capa como:

$$s_i^M = -2(t_i - a_i) \dot{f}^M(n_i^M) \tag{2.114}$$

que se puede representar de manera matricial:

$$\mathbf{s}_i^M = -2\dot{\mathbf{F}}^M(\mathbf{n}^M)(\mathbf{t} - \mathbf{a}) \tag{2.115}$$

Con esta última expresión se han obtenido ya todas las ecuaciones para completar el algoritmo de entrenamiento mediante retropropagación. El algoritmo iría como sigue:

1. Propagar a lo largo de la red los valores de entrada, para obtener la salida de la red con los pesos y bias actuales:

$$\mathbf{a}^0 = \mathbf{p} \tag{2.116}$$

$$\mathbf{a}^{m+1} = \mathbf{f}^{m+1}(\mathbf{W}^{m+1}\mathbf{a}^m + \mathbf{b}^{m+1}) \quad m = 0, 1, \dots, M - 1 \tag{2.117}$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}^M \tag{2.118}$$

2. Una vez calculada la salida de la red neuronal, se pueden calcular las sensibilidades, retropropagándolas a través de la red:

$$\mathbf{s}_i^M = -2\dot{\mathbf{F}}^M(\mathbf{n}^M)(\mathbf{t} - \mathbf{a}) \tag{2.119}$$

$$\mathbf{s}^m = \dot{\mathbf{F}}^m(\mathbf{n}^m)(\mathbf{W}^{m+1})^T \mathbf{s}^{m+1} \quad m = M - 1, \dots, 2, 1 \tag{2.120}$$

3. Una vez obtenidas las sensibilidades, se actualizan los pesos y bias:

$$\mathbf{W}^m(k + 1) = \mathbf{W}^m(k) - \alpha \mathbf{s}^m (\mathbf{a}^{m-1})^T \tag{2.121}$$



$$\mathbf{b}^m(k+1) = \mathbf{b}^m(k) - \alpha \mathbf{s}^m \quad (2.122)$$

4. Una vez actualizados los pesos y bias, se retorna al punto 1, hasta que la media de errores al cuadrado se reduce por debajo de la tolerancia fijada como aceptable.

**2.6.4.4.5. Aprendizaje: otras variantes** El método de retropropagación se basa en encontrar el mínimo de la función suma de errores al cuadrado, descendiendo en cada paso en dicha función a través del cálculo de la pendiente de la misma. Se trata por lo tanto de un método derivado del más conocido algoritmo de Newton. El método de Levenberg-Marquardt es una variación especialmente diseñada para entrenar redes neuronales entrenadas en base a la suma de mínimos cuadrados del error.

En el método general de Newton, la actualización de pesos y bias se realiza mediante la expresión:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - [\nabla^2 F(\mathbf{x})]^{-1} \cdot \nabla F(\mathbf{x}) \quad (2.123)$$

siendo en esta ocasión la función de evaluación, la suma de errores al cuadrado:

$$F(\mathbf{x}) = \sum e_i^2(\mathbf{x}) = \mathbf{e}^T(\mathbf{x})\mathbf{e}(\mathbf{x}) \quad (2.124)$$

Calculando las matrices Jacobiana y Hessiana de la suma de errores al cuadrado, se obtiene para este caso concreto la siguiente expresión de actualización de pesos y bias:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - [\mathbf{J}^T(\mathbf{x}_k)\mathbf{J}(\mathbf{x}_k)]^{-1} \cdot \mathbf{J}^T(\mathbf{x}_k)\mathbf{e}(\mathbf{x}_k) \quad (2.125)$$

siendo

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}_k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial e_1(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial e_1(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \frac{\partial e_2(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial e_2(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial e_2(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_N(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial e_N(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial e_N(\mathbf{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (2.126)$$

Esta nueva expresión se conoce como método de Gauss-Newton, y tiene como ventaja sobre el método de Newton general que no precisa del cálculo de derivadas segundas de la función de evaluación. Aún así, el método de Gauss-Newton tiene la desventaja de que la matriz  $\mathbf{H} = \mathbf{J}^T(\mathbf{x}_k)\mathbf{J}(\mathbf{x}_k)$  no tiene por qué ser invertible, con lo que el método en principio no sería de aplicación general. Para solventar este problema, se redefine la matriz  $\mathbf{H}$  como:

$$\mathbf{H} = \mathbf{J}^T(\mathbf{x}_k)\mathbf{J}(\mathbf{x}_k) + \mu\mathbf{I} \quad (2.127)$$

obteniendo así una matriz  $\mathbf{H}$  que es invertible sin más que adecuar el valor de  $\mu$ .

Con esta modificación, la actualización de pesos y bias del método de Levenberg-Marquardt

queda de la siguiente manera:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - [\mathbf{J}^T(\mathbf{x}_k)\mathbf{J}(\mathbf{x}_k) + \mu\mathbf{I}]^{-1} \cdot \mathbf{J}^T(\mathbf{x}_k)\mathbf{e}(\mathbf{x}_k) \quad (2.128)$$

El mayor problema del método de Levenberg-Marquardt es el cálculo de la matriz Jacobiana  $\mathbf{J}(\mathbf{x}_k)$  en las redes neuronales multicapa, que se tiene que calcular de nuevo mediante la técnica de retropropagación, debido a la interdependencia entre las capas.

El método de Levenberg-Marquardt es un método robusto para el entrenamiento de las redes neuronales basadas en la suma de errores cuadrados. La variación del parámetro  $\mu$  asegura la convergencia del entrenamiento, y acelera el proceso de aprendizaje de la red.

Como se ha comentado con anterioridad, uno de los problemas que pueden presentar las redes neuronales es el sobreaprendizaje, que provoca que respondan de manera correcta únicamente a los datos de entrenamiento, pero con una mala generalización, esto es, con un mal ajuste a valores distintos con los que ha sido entrenada. Uno de los métodos habituales para evitar este problema, es dividir los datos de experimentales en dos grupos, uno para realizar el entrenamiento, y el segundo para comprobar la adecuación de la simulación a los datos experimentales. De esta forma, se comprueba el comportamiento de la red con unos datos distintos a los de entrenamiento.

Aún así, en muchas ocasiones es conveniente usar un método adicional para mejorar la generalización de la red neuronal. Se trata de la regularización de la red neuronal. La regularización se basa en eliminar los pesos de menor valor de la red neuronal, haciéndolos nulos. Los pesos representan la interrelación entre las distintas variables de entrada a la red, con lo que al anularlas, se están eliminando interrelaciones débiles, que apenas aportan información adicional a los resultados, pero que convierten la red en innecesariamente compleja.

La mayoría de los métodos de regularización, se basan en modificar la función de evaluación para añadirle la suma de cuadrados de los pesos:

$$F(\mathbf{x}) = \beta \sum \mathbf{e}^T \mathbf{e} + \alpha \sum w_{i,j} \quad (2.129)$$

Así, el entrenamiento de la red se basará no sólo en reducir el error de la simulación, sino también el tamaño de los pesos, para conseguir una red que presente menos oscilaciones en la respuesta [182]. El mayor problema para obtener una red que presente una respuesta adecuada, al tiempo que tenga una buena generalización, es la selección de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ . El método más habitual es el de la regularización Bayesiana, que emplea el teorema de Bayes, sobre la probabilidad condicionada, para obtener una estimación de los parámetros más adecuados, mediante un análisis estadístico de los valores de entrada, suponiendo que estos están afectadas por un error de tipo gaussiano. Estos valores de  $\alpha$  y  $\beta$  se recalculan en cada iteración del entrenamiento, en función de los valores de suma de errores al cuadrado y suma de pesos.



## 2.7. Aplicación de PCMs en cerramientos de edificios

La aplicación de Materiales de Cambio de Fase a los cerramientos de edificios, cumple la doble función de estabilización de temperaturas, y de almacenamiento térmico:

- A pesar de que varios estudios consideran la baja difusividad térmica de los PCMs como una desventaja, en muchas aplicaciones puede ser una clara ventaja. En un cerramiento de un edificio la temperatura exterior cambia periódicamente, mientras que se desea mantener una temperatura interior constante. La baja difusividad puede ayudar a atenuar las variaciones térmicas del exterior[19].
- El correcto aprovechamiento de la energía solar normalmente precisa de un sistema de almacenamiento térmico, para poder hacer frente al desfase que existe entre la captación de energía y su posterior empleo. Los materiales de cambio de fase, debido a su gran capacidad de almacenamiento térmico, y su menor sobrecalentamiento, pueden ser un buen sistema de almacenamiento distribuido en los cerramientos de un edificio.

La gran superficie de intercambio de calor de la que disponen los cerramientos en el interior de los edificios, supone una ventaja adicional para la aplicación de los materiales de cambio de fase, puesto que compensan la baja conductividad térmica de los mismos. Esta ha sido otra de las claves por las que se ha investigado ampliamente la inclusión de los PCMs en los muros.

El cambio de fase de los PCMs requiere de estrategias especiales para su uso, para evitar que el material escape en su fase líquida. La inclusión de Materiales de Cambio de Fase en cerramientos se suele realizar en alguna de estas formas:

- Macroencapsulado: El PCM se encuentra confinado en elementos de tamaño medio-grande. En este tipo de encapsulamiento normalmente se suele dar convección natural en la fase líquida del PCM, favoreciendo el intercambio de calor. El PCM se suele incluir como una capa adicional del cerramiento [74, 23].
- Microencapsulado: El confinamiento en este caso se da a menor tamaño, envolviendo pequeñas gotas de PCM con un material exterior, normalmente polimérico, para evitar que se derrame cuando pasa a la fase líquida. A la hora de incluirlo en los cerramientos, se suele añadir mezclado a materiales clásicos de construcción, como hormigón o yeso [183, 184].
- Absorbido en materiales de construcción porosos: Se absorbe el PCM en fase líquida a un material convencional de construcción: ladrillos cerámicos, hormigón, yeso... Una vez el PCM ha sido absorbido, se somete a varios ciclos de solidificación y fusión para eliminar el sobrante líquido. El porcentaje de PCM que es posible incorporar a los cerramientos en este caso es notablemente inferior, puesto que en concentraciones elevadas, la parte líquida termina fluyendo fuera del cerramiento [185].

- Estabilizado: Usando polímeros entrelazados, se crea una red que es capaz de atrapar las moléculas de PCM sin que estas fluyan cuando alcancen el estado de fase líquida, con lo que se consigue un material sólido con las propiedades de un PCM [186].

Ismail y Castro [187] estudiaron la inclusión de PCMs en cerramientos, para clima tropical. Su trabajo combinó datos reales de ensayos, con la simulación numérica. El PCM se situó tanto en la pared expuesta a la radiación solar<sup>45</sup>, como en el techo del habitáculo. Demostraron que con la inclusión de los PCMs se puede obtener una importante estabilización de la temperatura interior, reduciendo el consumo de refrigeración, e incluso el tamaño de los equipos instalados hasta en un 30 %.

En la Universidad de Lleida se ha realizado un completo estudio del impacto de la utilización de PCMs en cerramientos, gracias a los cubículos experimentales de que disponen [188, 189, 190, 183, 191]. Sus trabajos se basan sobre todo en los datos experimentales obtenidos, aunque los combinan con simulaciones. Han demostrado que el uso de los PCMs puede suponer una reducción de la temperatura pico interior de uno a tres grados, retrasos de hasta dos horas en el máximo de temperatura y una reducción del consumo de un 15 %.

Por su parte, Mi et al [192] han simulado el comportamiento de térmico y la rentabilidad económica de emplear PCM en los cerramientos de edificios de oficinas para distintos climas de China. Debido a la gran extensión de este país, el análisis realizado se ha hecho sobre cinco tipos de clima muy diversos, que van desde el clima húmedo subtropical, a zonas con inviernos muy severos, o con gran variación de temperatura entre el verano y el invierno. Su conclusión es que la región con el clima más frío (Zhengzhou) presenta el mejor rendimiento energético y económico de la aplicación de PCMs, junto con Changsha y Sehyang, que presenta una gran variación de temperatura entre verano e invierno. El alto precio de los materiales de cambio de fase hace que la inversión no resulte rentable en las zonas tropicales analizadas.

Los ahorros de energía a conseguir, así como las propiedades óptimas para los PCMs dependen en gran medida de la climatología local y del uso del edificio. Esto hace que los cálculos previos a la instalación sean de vital importancia.

Además de en los propios cerramientos verticales, los PCMs también se han analizado para su inclusión en otro tipo de cerramientos y en cerramientos especiales:

- El tejado de un edificio es una fuente importante de intercambio de calor. La radiación solar sobre un tejado puede acercarse a los 1000 W/m<sup>2</sup> y de esta absorberse hasta un 95 % [193]. En climas cálidos esta energía provoca un aumento importante de la demanda de refrigeración interna. Alawadhi et al [194] proponen la inclusión de PCMs en cavidades de forma cónica en el tejado, demostrando que se puede reducir el flujo de calor al interior hasta en un 39 %.
- Las ventanas, y en general los cerramientos semitransparentes, son un método adecuado en climas templados y fríos para aumentar la entrada de radiación solar hacia el interior de los edificios, calentándolos. El inconveniente de este tipo de cerramiento es

<sup>45</sup>En este caso la pared norte, por realizarse el experimento en Brasil, hemisferio sur



un peor control de las pérdidas térmicas al exterior en ausencia de sol. Weinlädner et al [195] propusieron la inclusión de parafinas en el espacio intermedio de ventanas de doble acristalamiento. Las parafinas son bastante transparentes en estado líquido, volviéndose opacas en estado sólido. Esta cualidad, unida a la baja conductividad de los PCMs permiten reducir las pérdidas al ambiente en un 30 %, reduciendo además los sobrecalentamientos durante el día, y sin perder luz natural en el interior. Una empresa alemana está comercializando un sistema comercial denominado “Power Glass” basado en este concepto [44].

- El grupo de investigación de la UPV/EHU ENEDI ha estudiado el comportamiento de una fachada ventilada con inclusión de PCMs en su hoja exterior. Los primeros ensayos han demostrado su buen comportamiento térmico, manteniendo el calentamiento de aire en el canal tiempo después de desaparecer la radiación solar. Una comparativa con cerramientos convencionales demuestra una mayor estabilización de las temperaturas interiores, con el añadido de poder disponer de aire caliente para calefacción<sup>46</sup> [196].

La aplicación de los materiales de cambio de fase a los cerramientos de edificios cumple la doble función de almacenamiento térmico, y de estabilización de temperaturas, para conseguir una mejora del confort interno, mejorando al mismo tiempo el aprovechamiento tanto de las fuentes de energía internas, como de la radiación solar.

A pesar del interés que suscita la aplicación de los materiales de cambio de fase en los cerramientos, la mayoría de los estudios publicados hacen referencia al estudio experimental y simulaciones de casos y configuraciones concretas. Sin embargo, el análisis más sistemático del comportamiento de los PCMs en los cerramientos, para definir los parámetros óptimos de funcionamiento, es más bien escaso.

Peippo et al [201] analizan en 1991 el comportamiento de un muro multicomponente, con inclusión de PCM, para optimizar el calentamiento solar en una vivienda pasiva. Este tipo de viviendas suele disponer de un gran ventanal orientado al sur, para permitir la entrada de radiación solar, que es almacenada en forma de calor sensible en los materiales. Esta configuración suele provocar sobrecalentamientos, y una reducción del confort interior de la vivienda en las horas centrales del día. El artículo estudia en tres fases el comportamiento térmico de paneles de pcm que reciben radiación solar directa.

En una primera aproximación, consideran un material puro, despreciando la aportación del calor sensible, y usan la condición de Stefan en la frontera para simular el cambio de fase. De esta forma consiguen obtener unas ecuaciones aproximadas para el cálculo de la temperatura óptima de cambio de fase, y el espesor óptimo de la capa de PCM. La temperatura óptima de cambio de fase según esta aproximación sería:

$$T_{opt}^* = \bar{T} + \frac{Q}{h \cdot t_{stor}} \quad (2.130)$$

<sup>46</sup>En el ensayo no se aprovechó el aire caliente para calefactar el interior, con lo que no se pudo hacer una evaluación de su influencia

siendo  $Q$  la cantidad de radiación absorbida por unidad de superficie de la habitación,  $t_{stor}$  el ciclo diario de carga-descarga (normalmente 24 h),  $h$  el coeficiente de convección, y  $\bar{T}$  es la temperatura media de la habitación durante el día y la noche, ponderada por el tiempo.

Por su parte, el espesor óptimo de la capa de PCM se define por la ecuación:

$$D_{opt} = \frac{t_n h}{\rho \lambda} (T_{opt}^* - T_n) \quad (2.131)$$

siendo  $t_n$  el tiempo de descarga por la noche, y  $T_n$  la temperatura media de la habitación durante la descarga.

Como se puede observar, la temperatura de cambio de fase es uno de los parámetros más importantes para el funcionamiento óptimo de los sistemas de almacenamiento de energía. Cuando el material recibe calor directamente, la temperatura óptima está por encima de la temperatura media del local, en una cantidad que depende de la cantidad de radiación recibida y el coeficiente de convección superficial. Además este valor es independiente de las propiedades del material.

Por su parte, el espesor óptimo viene marcado por la posibilidad de solidificar todo el pcm durante la noche, y esto a su vez marca el máximo calor almacenado útil.

Esta primera aproximación se ha hecho para unas condiciones de análisis estáticas, esto es, suponiendo que todos los días son iguales, sin incluir condiciones meteorológicas. Para mejorarlo, se recurre a un análisis más detallado en diferencias finitas, con el método de entalpía explícito, incluyendo el calor latente de cambio de fase como un término fuente adicional.

Comparando dos casos dispares como Helsinki y Madison, concluyen que aunque los valores de energía ahorrada son muy diferentes, los puntos óptimos prácticamente coinciden, con la temperatura óptima 1-3°C por encima de la de la habitación y el espesor óptimo en 10-15 mm.

Finalmente, aplican estas condiciones para un edificio completo. El programa empleado no permite incluir el cambio de fase, por lo que lo simulan como un material con calor sensible constante igual a la suma del calor sensible y el latente dividido por el rango de variación de temperaturas.

Posteriormente, Stovall y Tomlinson [202] analizan el comportamiento de un cerramiento con PCM en un habitáculo opaco, sin entrada de radiación directa al interior. El muro de este habitáculo se trata de un material compuesto, en el que la capa más interna está configurada por una placa de yeso con PCM embebido en ella. Realizan para este modelo una serie de simulaciones mediante el software TRNSYS, analizando la capacidad del PCM para trasladar los picos de demanda de energía hacia horarios de tarifa valle. El objetivo de su estudio no es por lo tanto el ahorro total de energía consumida en acondicionar el espacio, sino el ahorro económico al reducir el coste de la energía.

Como resultado de su trabajo, concluyen que el porcentaje de PCM óptimo para esa configuración es del 10 %, aunque añaden que en situaciones climáticas distintas, ese porcentaje puede variar. Además, concluyen que es la convección superficial la que limita la capacidad de



almacenamiento, y no la conductividad del material de cambio de fase.

Neeper [203] analiza en el año 2000 el comportamiento de un cerramiento con PCM. Inicialmente se centra en un muro que no recibe la radiación solar directa, situado como partición interna de un edificio, y considerado por lo tanto como adiabático. En estas condiciones, el máximo de energía almacenada en el PCM se consigue cuando la temperatura de cambio de fase coincide con la temperatura media del interior. Este resultado coincide con la temperatura óptima calculada por Peippo et al (ecuación 2.130), ya que al no haber radiación incidente sobre el PCM, la temperatura óptima coincide con la temperatura media del interior. Analiza también la influencia del intervalo de cambio de fase para materiales no puros, y obtienen mejor resultado cuando el intervalo de temperaturas es más estrecho. Además, concluyen que el coeficiente de convección tiene una gran influencia en la cantidad de energía almacenada, tal y como concluyeron Stovall y Tomlinson [202].

En una segunda fase del mismo trabajo, analiza el caso de un muro situado al exterior del edificio, recibiendo radiación directa en la parte exterior del muro. Con estas condiciones, la temperatura media del panel de PCM coincide con la temperatura media de la capa en la que se encuentra situado, independientemente de las propiedades del propio material. Esto significa que el flujo de calor neto diario a través de la pared no va a depender de que exista o no un PCM en la misma, ni de las propiedades del PCM. Además de calcular el intercambio neto de calor, y el calor almacenado en el PCM, calcula cuánto calor se cede al interior de la sala (el resto vuelve al exterior), y en este caso el máximo calor cedido al interior se da con una temperatura de cambio de fase cercana a la temperatura media de la sala.

## Capítulo 3

# Objetivos y Metodología

---

3.1. Objetivos . . . . .	82
3.2. Metodología . . . . .	82

---

### 3.1. Objetivos

La inclusión de materiales de cambio de fase en los cerramientos de edificios está todavía en una fase inicial de aplicación. Los mayores condicionantes a los que se enfrenta posiblemente sean el alto coste de los materiales, unido a la incertidumbre sobre su durabilidad a largo tiempo. Estos dos inconvenientes obligan a realizar un profundo análisis previo de los materiales a emplear, su disposición óptima, espesor y cantidad, lo que requiere la realización de un gran número de estudios previos, incluidas mediciones experimentales y simulaciones por ordenador del comportamiento térmico tanto de los materiales, como de los muros donde van a ser incluidos, que permita definir el aprovechamiento óptimo del material a emplear.

El objetivo principal de la presente tesis es desarrollar un método de simulación del comportamiento de los PCM en los cerramientos de los edificios, para poder estimar el beneficio que suponga su aplicación, y poder optimizar sus propiedades y/o cantidades en función del uso y de las condiciones climatológicas de cada lugar, partiendo del análisis experimental de propiedades, hasta la definición de propiedades óptimas del material de cambio de fase. El algoritmo de simulación empleado ha de suponer un coste computacional bajo, sin perder al mismo tiempo una suficiente exactitud en los resultados obtenidos.

Además de lo ya expuesto, el algoritmo habrá de considerar los siguientes aspectos [16]:

- **Eficiencia:** Relación entre coste computacional y precisión de los resultados. Interesa un método que produzca resultados suficientemente correctos, pero sin excesivo coste computacional.
- **Robustez:** Se trata de un concepto con dos definiciones diferentes, siendo en este caso ambas deseables:
  - Desde la perspectiva de la programación, un programa robusto es aquel que puede seguir funcionando a pesar de pequeños errores en los datos con los que trabaja, debido a la inclusión de criterios de selección de dichos datos.
  - Desde la perspectiva estadística, hace referencia a la capacidad del algoritmo de afrontar datos anómalos sin provocar una desviación excesiva de los resultados.
- **Facilidad de implementación:** Se busca un algoritmo lo más sencillo posible de implementar, sobre todo porque a mayor complejidad de implementación, mayor coste de cálculo, y por lo tanto peor implementación para grandes cálculos como edificios completos.
- **Escalabilidad:** Interesa disponer de un algoritmo cuyo coste computacional no aumente sobremanera con el tamaño del modelo

### 3.2. Metodología

El desarrollo del presente trabajo ha seguido la siguiente metodología:

1. Medición experimental del comportamiento térmico de PCMs (Parte II). Para definir un método de cálculo adecuado para el estudio del comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase, es necesario disponer de datos experimentales con los que contrastar los resultados de los modelos que se van a proponer. En este caso se han decidido utilizar dos materiales, un PCM experimental que vamos a denominar Termiplast23, desarrollado por la empresa Beissier, y el producto comercial Energain, de la empresa Dupont. Se han realizado los siguientes ensayos con ellos:
  - DSC: se ha procedido a someter los materiales a una calorimetría de barrido diferencial, o DSC<sup>1</sup>, para analizar su comportamiento. El tamaño de muestra en este caso es bastante reducido, menos de 10 mg.
  - Conductivímetro: se ha construido una probeta con el material, y se ha sometido a una variación de temperaturas en un conductivímetro, analizando tanto las variaciones de temperaturas en diferentes puntos de la muestra, como los flujos de calor.

Se ha planteado emplear dos materiales, para poder analizar el comportamiento de los métodos planteados en materiales diversos, y distintas configuraciones. El Termiplast es un mortero basado en yeso, con PCM microencapsulado añadido, lo que permite crear una probeta de mayor espesor, con sondas de temperatura en su interior, y por lo tanto con más puntos de control de la evolución del material a lo largo de los ensayos. Por su parte, Energain es un PCM mezclado con un polímero que le da estabilidad estructural en estado líquido, y se presenta laminado entre dos placas de aluminio, con lo que se presenta en unos espesores determinados.

2. Desarrollo del método en diferencias finitas (Capítulo 7). Como primera propuesta, se plantea desarrollar un método en diferencias finitas, por se el más adecuado a la geometría del problema, con el PCM distribuido de manera homogénea en una capa dentro del muro compuesto, y flujo de calor unidimensional. Este capítulo propone el desarrollo de un método, y compara los resultados de la aplicación del mismo con los datos experimentales obtenidos en los ensayos de conductivímetro.
3. Desarrollo del método de redes neuronales (Capítulo 8)). Como alternativa al procedimiento habitual de empleo de diferencias finitas, se analiza la posibilidad de emplear un método indirecto de aprendizaje automático, y más en concreto, el método de las redes neuronales. Estas presentan un buen comportamiento para los problemas no lineales, con lo que se podrían ajustar muy bien al comportamiento de los PCMs durante su cambio de fase. Igual que en el capítulo anterior, se va a contrastar el comportamiento de las redes neuronales con los datos experimentales obtenidos en los ensayos del conductivímetro.

<sup>1</sup>De sus iniciales en inglés, Differential Scanning Calorimeter



4. Comparativa de métodos (Capítulo 9). Se compara el comportamiento de los distintos métodos frente los datos experimentales del ensayo de conductivímetro, para definir cuál presenta mejor ajuste. El método que mejor comportamiento muestre será el que se utilice en el resto de simulaciones.
5. Implementación del método final (Capítulo 10). Con el método elegido en el capítulo anterior, se va a proceder a desarrollar el modelado de una serie de cerramientos compuestos, con materiales convencionales y una capa con material de cambio de fase. En este capítulo se va a explicar el método propuesto para el cálculo del comportamiento de un muro compuesto.
6. Análisis de parámetros del PCM (Capítulo 11). Una vez desarrollado el modelo de los muros compuestos, se va a proceder a realizar una serie de simulaciones para analizar qué condiciones se deben dar para obtener un funcionamiento óptimo de estos materiales en cuanto a la cantidad de energía almacenada, reducción de los flujos de calor, y mejora del confort interior.

## **Parte II**

# **Análisis experimental**



## Capítulo 4

# Selección de materiales y técnica de ensayo

---

<b>4.1. Selección de materiales</b> . . . . .	<b>88</b>
<b>4.2. Fabricación de probetas</b> . . . . .	<b>89</b>
4.2.1. Termiplast . . . . .	89
4.2.2. Energain . . . . .	89
<b>4.3. Técnicas de ensayo</b> . . . . .	<b>93</b>

---



Como primer paso para desarrollar el método de cálculo del comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase, se han seleccionado dos materiales sobre los que realizar las mediciones y validar posteriormente la adecuación de los algoritmos desarrollados. En el presente capítulo se presentan los materiales escogidos, se describen las probetas sobre las que se han realizado las mediciones, y finalmente se plantean los métodos de ensayo disponibles para pasar en los siguientes capítulos a presentar las mediciones.

## 4.1. Selección de materiales

Se parte de la definición de las condiciones y propiedades que deberían tener los materiales a emplear. A priori, las principales características que se han planteado son las siguientes:

- **Material de uso comercial:** se desea ensayar y modelizar soluciones reales, con lo que el material sobre el que se quiere trabajar desde el principio es un material comercial, o por lo menos un material que se asemeje lo más posible a las soluciones comerciales existentes en la actualidad, o esté en su fase final de desarrollo. De esta forma, los valores de conductividades, calor sensible y calor latente, estarán en el rango habitual de estos materiales.
- **Fácilmente conformable:** va a ser necesario la realización de una probeta de dimensiones fijadas por los equipos de ensayo. Además, posiblemente habrá que situar termosondas y fluxímetros en varias zonas de la probeta, e incluso en posiciones intermedias del espesor. Esto va a requerir el uso de soluciones que o bien sean modulables<sup>1</sup>, o sean mezclas de matriz convencional y PCM<sup>2</sup>, que permiten conformar con total libertad la probeta que se desee.
- **Gran homogeneidad:** Es preferible emplear un material lo más homogéneo posible, para simplificar en una primera etapa los modelos propuestos, y reducir el nivel de errores debido a una gran heterogeneidad del material.

Se ha decidido ensayar dos materiales diferentes, y hacer el análisis en dos etapas. En primer lugar, se decide usar Termiplast, un mortero de yeso con PCM microencapsulado, que permite conformarse en distintos espesores, y disponer varias sondas intercaladas a lo largo del espesor. Este material se va a usar para realizar las primeras pruebas de validación de los distintos métodos de simulación, debido a que su facilidad de conformado permite la disposición de sondas intermedias, y el empleo de espesores mayores de probeta con la que observar mejor la evolución de la onda de temperatura en el interior del material.

Para mejorar el análisis de la adecuación de los distintos algoritmos, se decide ensayar también un segundo material. Se trata de Energain, que viene conformado en forma de placa, con el PCM embebido en un copolímero, entre dos placas metálicas. Con este material se

<sup>1</sup>p.e. con la superposición de varias capas de sistemas macroencapsulados, se podrían disponer las sondas en las caras intermedias

<sup>2</sup>Como PCMs absorbidos en yeso o en hormigón

realiza un mayor número de pruebas en el laboratorio, para disponer de una mayor cantidad de datos, pensando en el empleo de técnicas indirectas de aprendizaje automático, que normalmente requieren del conocimiento previo del comportamiento de los materiales ante gran diversidad de situaciones.

## 4.2. Fabricación de probetas

### 4.2.1. Termiplast

Vistos los requisitos previos, se ha partido de un material desarrollado por la empresa Beissier, que se encuentra en fase de desarrollo final. Se trata de un mortero de yeso con un PCM, en concreto el compuesto microencapsulado Micronal DS5008, con un punto de fusión aproximado a 23°C<sup>3</sup>. Se ha elegido este material por cumplir con todas las condiciones impuestas previamente. Nos vamos a referir a este material como Termiplast23 o Termiplast, por ser el nombre comercial que se está barajando para este producto.

Debido a su presentación en forma de mortero, es necesario fabricar una probeta para poder llevar a cabo las mediciones sobre este material. Las dimensiones de la probeta son 600 mm x 600 mm x 70 mm. Se ha determinado la densidad de la probeta por medición y pesado de la misma, siendo esta de 678.94 kg/m<sup>3</sup>, con una incertidumbre de  $\pm 5\%$ . La probeta se realizó en cuatro etapas, para facilitar la inserción de sondas en su interior y medir la variación de temperatura a lo largo del espesor de la muestra. Se pueden observar las distintas capas de la probeta en la imagen 4.1. En el centro de cada intercara se ha dispuesto un termopar, con una incertidumbre en la medición de  $\pm 0.4^\circ\text{C}$ .

En las dos superficies exteriores de la probeta se han dispuesto también sondas de temperatura y flujo. Los fluxímetros se han situado en el centro de la superficie, para disminuir las variaciones de flujo debido al efecto borde. El error de medición de los fluxímetros es de  $\pm 0.1 \text{ W/m}^2$ . Las sondas de temperatura son del tipo PT100, con un error de medición de  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ . Se han dispuesto tres sondas en cada superficie, una centrada, otra hacia el lateral derecho, y la tercera en una esquina. Se puede observar la disposición de estas sondas en la imagen 4.2. Con esta disposición de sondas se puede analizar la homogeneidad de la temperatura sobre la superficie de la probeta.

### 4.2.2. Energain

El segundo material que se ha propuesto ensayar es el producto comercial Energain, de la empresa Dupont [199]. Este producto está conformado por dos láminas de aluminio entre las que se sitúa una mezcla de copolímero y una parafina, que actúa como material de cambio de fase. La conformación del producto en forma de placa facilita en gran medida su instalación

<sup>3</sup>Como se verá más adelante durante el examen de las propiedades del material, el punto de fusión que se menciona no es más que una indicación, puesto que este material presenta un rango de fusión amplio



Figura 4.1: Vista del espesor de la probeta, donde se pueden observar las capas que la forman

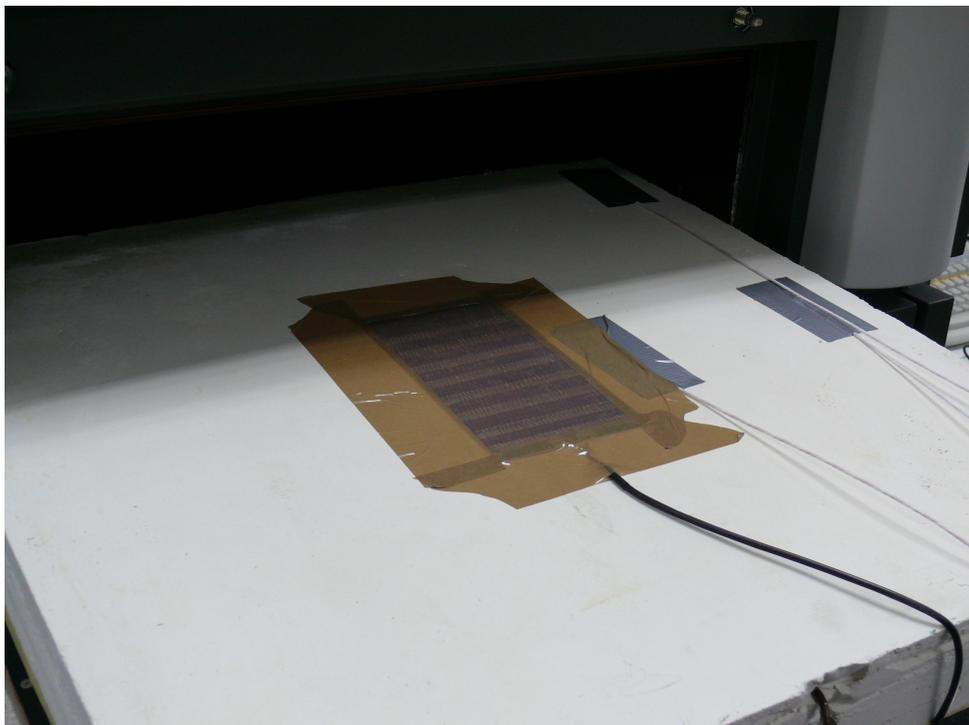


Figura 4.2: Disposición de sondas superficiales

sobre un cerramiento convencional, lo que unido a su bajo espesor y gran contenido en PCM lo hace adecuado tanto para rehabilitación de edificios, como para nueva construcción.

En este producto, el PCM está atrapado en la matriz polimérica, con lo que no fluye en estado líquido, y el panel se mantiene por lo tanto estable. Para reforzar la estanqueidad del material, se recomienda la utilización de una cinta adhesiva en los bordes, para anular el riesgo de fuga. En la imagen 4.3 se puede ver el aspecto que presentan las placas de Energain.



Figura 4.3: Placas Energain de Dupont

Los datos aportados por el fabricante respecto a las propiedades de estos paneles se muestran en la tabla 4.1. Como se puede observar de los datos facilitados, el porcentaje de PCM en los paneles es del 60 %, con una capacidad latente de más de 70 kJ/kg, y una capacidad térmica total en el rango de 0 a 30°C de unos 140 kJ/kg. De los datos proporcionados se puede extraer que el calor específico del material es de 2.33 kJ/kg·K.

Propiedad	Valor	Unidad
Espesor	5.2	mm
Peso por área	4.5	kg/m <sup>2</sup>
Espesor del aluminio	100	μm
Contenido en parafina	60	%
Punto de fusión	21.7	°C
Capacidad latente (0-30 °C)	> 70	kJ/kg
Capacidad térmica total (0-30 °C)	~ 140	kJ/kg
Conductividad sólido	0.18	W/m·K
Conductividad líquido	0.14	W/m·K

Tabla 4.1: Propiedades de los paneles Energain

Ensayos previos sobre este material determinaron que realizar el ensayo sobre una única placa no produce datos significativos sobre la evolución de temperaturas en cada una de sus superficies, debido al bajo espesor de la placa, y el empleo de la cinta de sellado de aluminio, que actúa en parte como puente térmico. Por este motivo, se ha decidido proceder a otra configuración sugerida por el fabricante, con dos placas apiladas una sobre otra, de manera que exista una mayor diferencia de temperaturas entre ambas caras, y se pueda analizar mejor la evolución de sus temperaturas.

Igual que se ha realizado en el Termiplast, se han dispuesto sondas de temperatura y flujo en ambas superficies. Los fluxímetros se han situado en el centro de la superficie, dentro del área de medición del propio conductivímetro. El error de medición de los fluxímetros es de  $\pm 5\%$  de la magnitud medida. Las sondas de temperatura son del tipo PT100, con un error de medición de  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ . Se han dispuesto dos sondas en cada superficie, adyacentes al área ocupada por los fluxímetros, tal y como se puede observar en la imagen 4.4. Se ha empleado el mismo conductivímetro del ensayo anterior (apartado 6.1), de la marca Netzsch, modelo HFM 436/6/1 Lambda.

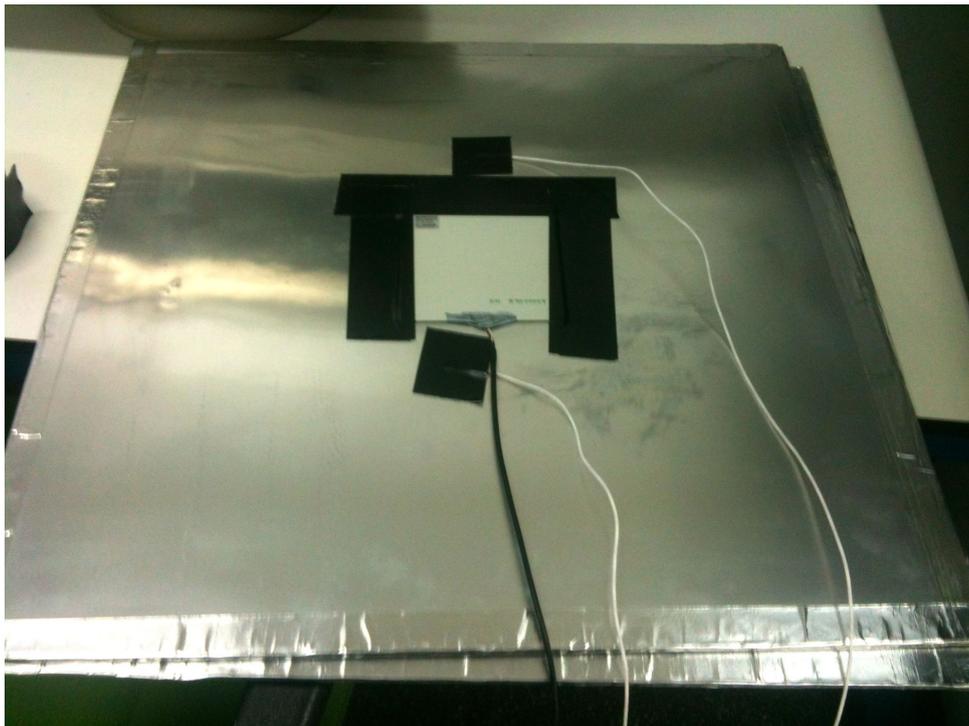


Figura 4.4: Fluxímetro y sondas de temperatura sobre una placa de Energain

En esta ocasión no se han dispuesto sondas de temperatura intermedias entre las dos placas, puesto que con la baja diferencia de temperaturas que suele presentar este material entre sus caras, no se consideró que aportaran información significativa. Además, el ensayo sobre este material está planteado para profundizar en el análisis de los métodos de aprendizaje automático, para los que no se evalúa la temperatura en el interior de la probeta, como se verá en el capítulo 8.

### 4.3. Técnicas de ensayo

Además de definir el tipo de material que se va a ensayar, es necesario definir el tipo de ensayos que se van a emplear tanto para la medición de propiedades, como para la posterior validación de los algoritmos de cálculo propuestos.

Uno de los aspectos más importantes para la simulación del comportamiento de los PCMs, es la correcta caracterización de la propia transición de fase, con la definición del intervalo de temperaturas en el que sucede la transición, y el calor total intercambiado durante la misma. Para ello el método más utilizado, y el que se va a emplear también en esta ocasión, es el DSC o calorimetría de barrido diferencial. Se trata de un método habitual de determinación de las curvas de fusión/solidificación de los materiales de cambio de fase. En él, se somete una pequeña muestra<sup>4</sup> del PCM a un calentamiento y enfriamiento en el que se mide la potencia a la que el material absorbe o emite energía al ir variando su temperatura, de manera que se obtiene la curva de entalpía-temperatura por integración. En el capítulo 5 se describen los ensayos realizados sobre ambos materiales.

El objetivo final de esta tesis es obtener un método de simulación del comportamiento térmico de PCMs en cerramientos de edificios. El método desarrollado por lo tanto debería tener un acercamiento similar al que se suele emplear en el análisis del comportamiento térmico de los cerramientos convencionales, como los métodos de factores de respuesta, o de CTF para simular los muros convencionales. En concreto, un algoritmo que calcule los flujos de calor a ambos lados del muro, usando como datos de entrada la evolución de las temperaturas exteriores. Es necesario por lo tanto obtener la relación que existe entre las temperaturas superficiales y los flujos de calor, y disponer de un equipo que permita medir los flujos de calor al ir variando la temperatura de la muestra.

Los requisitos previos que ha cumplir este ensayo son los siguientes:

- Una correcta medición de temperaturas y flujos de calor
- Una geometría similar a la del objeto a simular. En este caso se pretende simular paredes, luego es necesaria una geometría plana
- Una buena regulación de temperaturas y/o flujos de calor durante el ensayo
- La menor interferencia posible de otros materiales en la muestra
- Un tamaño suficiente y/o sistemas para eliminar efectos de borde durante el ensayo<sup>5</sup>

Se ha decidido usar una solución novedosa, la realización del ensayo en un conductivímetro. Esta solución cumple con todas las condiciones propuestas anteriormente, y cuenta con la simplicidad adicional de ser un equipo de tamaño medio, y no precisa por lo tanto de una infraestructura tan importante como las soluciones a escala real. Un método similar ya fue

<sup>4</sup>Se suelen usar mg de material

<sup>5</sup>El flujo de calor durante el ensayo debe ser lo más unidimensional posible, y perpendicular a la muestra, como sucede en las paredes reales

usado por Joulin et al [197]. Este equipo permite variar las temperaturas en ambas caras de la probeta, y medir los flujos de calor, con un tamaño de muestra manejable. Mientras que los equipos habituales de ensayo de cerramientos a escala real requieren de tamaños de probeta de  $4 \text{ m}^2$  o incluso superiores, el conductivímetro requiere de tamaños de muestra de  $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ . Schossig et al [198] emplearon un sistema similar para ensayar muestras de  $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ . En el caso de Schossig, se controlaba el flujo de calor en cada una de las placas, mientras que el conductivímetro controla las temperaturas superficiales.

En concreto, se ha empleado un conductivímetro de la marca Netzsch, modelo HFM 436/6/1 Lambda, que es capaz de determinar la conductividad con un margen de incertidumbre de  $\pm 1.5\%$ <sup>6</sup>. Se puede ver el equipo en la imagen 4.5, con una de las muestras ensayadas en su interior.



Figura 4.5: Conductivímetro con la muestra ensayada en su interior

Este equipo no permite una regulación exacta de la variación de temperaturas en ambas caras de la muestra. El conductivímetro está diseñado para medir la conductividad de muestras a distintas temperaturas, con lo que sólo se puede definir una secuencia de temperaturas medias de la muestra en las que medir la conductividad, y el salto de temperaturas entre ambas caras. El equipo enfría o calienta en cada cara hasta conseguir las condiciones marcadas, y las mantiene durante el tiempo suficiente como para medir la conductividad. Encadenando varios puntos de medición diferentes, se puede ensayar la muestra bajo diferentes velocidades de calentamiento y enfriamiento. Este ensayo se presenta en el capítulo 6.

<sup>6</sup>Aunque la normativa establece un margen de incertidumbre de  $\pm 3\%$ , todas las verificaciones hechas con este equipo sobre muestras calibradas dan un rango de  $\pm 1.5\%$

## Capítulo 5

# Ensayo de DSC

---

5.1. Termiplast . . . . .	96
5.2. Energain . . . . .	97

---



El DSC es probablemente la técnica más habitual para la medición de las propiedades térmicas de los PCMs durante la transición de fase. Mediante la calorimetría diferencial de barrido, se puede analizar el intercambio de calor durante el cambio de fase para analizar tanto el intervalo de temperaturas de cambio de fase, como el calor específico y el calor latente del material. En el presente capítulo se muestran los resultados de utilizar esta técnica sobre los dos materiales analizados. Estas medidas fueron realizadas en un DSC de Mettler-Toledo, model DSC1, con una precisión de  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  en la medición de temperatura. Para pesar las muestras se utilizó la balanza que posee el equipo TGA/DSC1 de Mettler-Toledo, con una precisión de  $\pm 0.001$  mg.

## 5.1. Termiplast

Se han tomado 5 muestras de diferentes partes de la probeta preparada con el Termiplast<sup>23</sup><sup>1</sup>. Al analizar diferentes puntos de la probeta comprobamos al mismo tiempo la homogeneidad de la misma, y reducimos el error muestral. En la tabla 5.1 se muestran los datos con la denominación de cada una de las muestras, los pesos de crisol, muestra y conjunto a ensayar (crisol+muestra+tapa de crisol), y la fecha de ensayo.

ID	Crisol (mg)	Muestra (mg)	Peso total (mg)	Fecha de ensayo
TP1	32.702	6.679	54.900	14/04/2011
TP2	32.510	6.286	54.770	14/04/2011
TP3	32.507	4.645	53.095	14/04/2011
TP4	32.661	5.939	54.275	14/04/2011
TP5	32.488	4.450	52.742	15/04/2011

Tabla 5.1: Datos de las muestras ensayadas en DSC

Todas las muestras fueron sometidas a 4 ciclos entre  $0^{\circ}\text{C}$  y  $40^{\circ}\text{C}$ , con una velocidad de  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . En cada extremo del ciclo, a  $0^{\circ}\text{C}$  y a  $40^{\circ}\text{C}$ , se mantiene la muestra a temperatura constante durante 5 minutos. Las medidas se han realizado con  $\text{N}_2$ , y la toma de datos se ha realizado cada segundo. Se comprobó la buena repetibilidad de los ciclos, y se usó la media de los cuatro como valor definitivo.

En la figura 5.1 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las muestras. Como se puede observar, los ensayos de las muestras TP1 y TP5 difieren del resto, pero se compensan entre sí, quedando la media resultante en valores similares a los de las muestras TP2, TP3 y TP4. La diferencia entre ensayos probablemente se deba a heterogeneidades en el material.

En la imagen 5.2 se muestra en exclusiva la media de los ensayos realizados. Se puede observar que este material muestra una histéresis de unos  $2^{\circ}\text{C}$ . El cambio de fase ocurre a

<sup>1</sup>Las muestras se han tomado con posterioridad al realizar el ensayo en el conductímetro, para obtener los datos reales del material ensayado

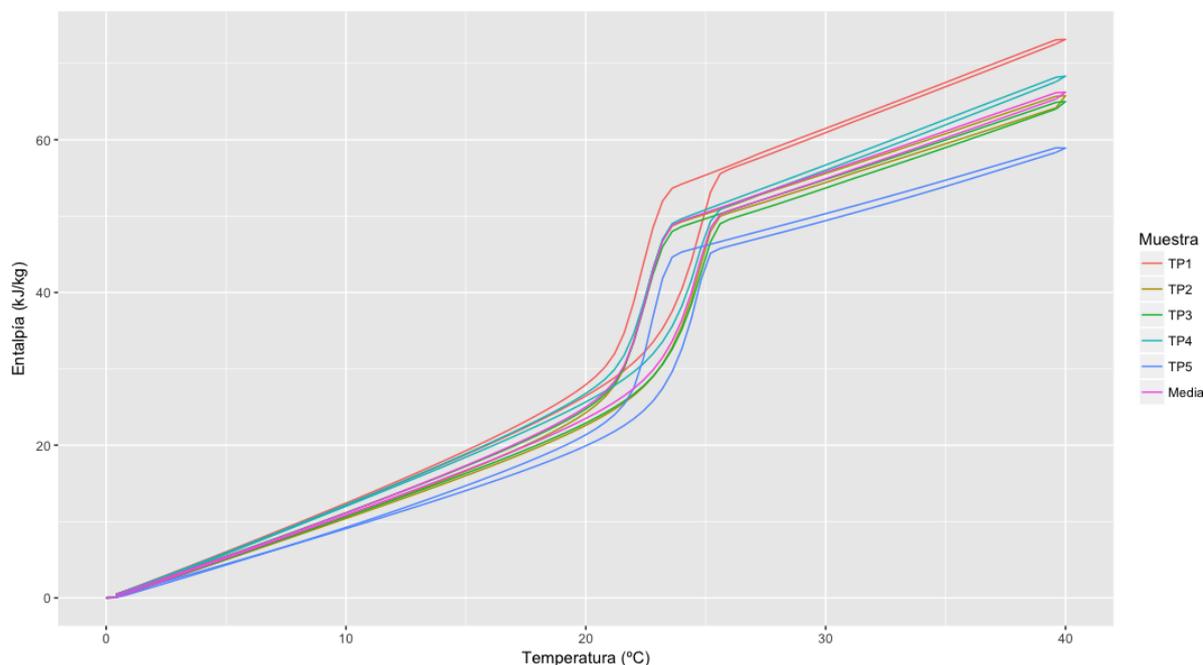


Figura 5.1: Resultados del DSC en las 5 muestras de Termiplast23

diferentes temperaturas durante la fusión y la solidificación. Se trata de un comportamiento habitual en los PCMs basados en parafinas.

Los valores de las propiedades medidas mediante el ensayo de DSC se presentan en la tabla 5.2.

Propiedad	Valor	Unidades
T <sup>a</sup> inicio fusión	23.00	°C
T <sup>a</sup> final fusión	25.40	°C
T <sup>a</sup> inicio solidificación	23.60	°C
T <sup>a</sup> final solidificación	21.20	°C
Calor esp sólido (25 °C)	1.26	kJ/kg·K
Calor esp líquido (35 °C)	1.09	kJ/kg·K
Calor latente	23.50	kJ/kg

Tabla 5.2: Propiedades obtenidas del análisis DSC del Termiplast

## 5.2. Energain

El Energain está formado por una parafina, que cumple la función del material de cambio de fase, y un copolímero que estabiliza el PCM en su fase líquida, evitando que fluya fuera de la placa. Por este motivo se ha ensayado en DSC una muestra de 4.481 mg de PCM aislado, y una muestra de 5.295 mg de la mezcla de PCM y copolímero. Se han realizado tres ciclos de medición entre las temperaturas de -30 °C y 45 °C. En la figura 5.3 se representa el resultado

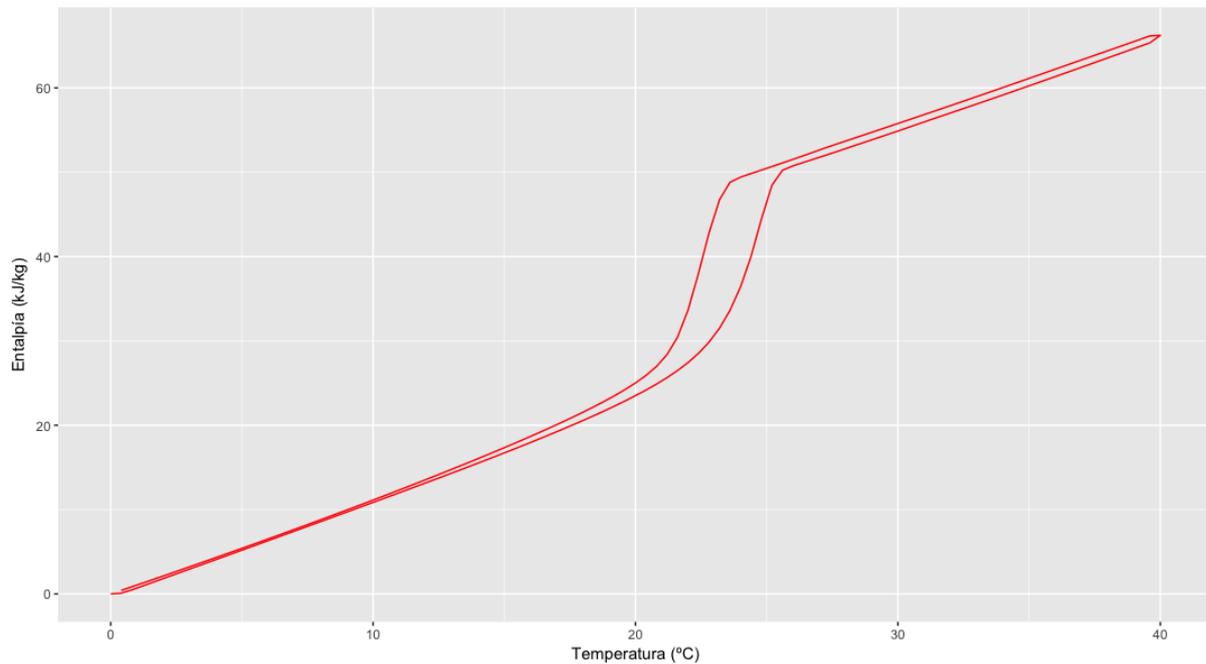


Figura 5.2: Curva media de Entalpía-Temperatura del Termiplast23

medio de los ensayos sobre el PCM aislado, mientras que en la figura 5.4 se representa el resultado del ensayo sobre la mezcla de parafina y copolímero.

Como se puede observar, la mezcla del PCM y copolímero (figura 5.4) presenta una menor entalpía de cambio de fase, con un menor salto de entalpía durante el cambio, además de un desplazamiento de la temperatura de cambio de fase, hacia temperaturas más bajas, y un aumento notable en el intervalo de cambio de fase. Se aprecia también un aumento de la histéresis que pasa de ser en el material puro de unos 3°C, a ser de 5°C, para la mezcla.

En la tabla 5.3 se presenta el valor de las propiedades medidas tanto sobre el PCM sobre la mezcla de parafina y copolímero.

Propiedad	PCM	Mezcla	Unidades
T <sup>a</sup> inicio fusión	22.25	13.75	°C
T <sup>a</sup> final fusión	28.10	27.00	°C
T <sup>a</sup> inicio solidificación	25.25	20.08	°C
T <sup>a</sup> final solidificación	19.10	6.17	°C
Calor esp sólido (0 °C)	2.89	3.10	kJ/kg·K
Calor esp líquido (35 °C)	2.60	2.25	kJ/kg·K
Calor latente	150.00	102.15	kJ/kg

Tabla 5.3: Propiedades obtenidas del análisis DSC del Energain

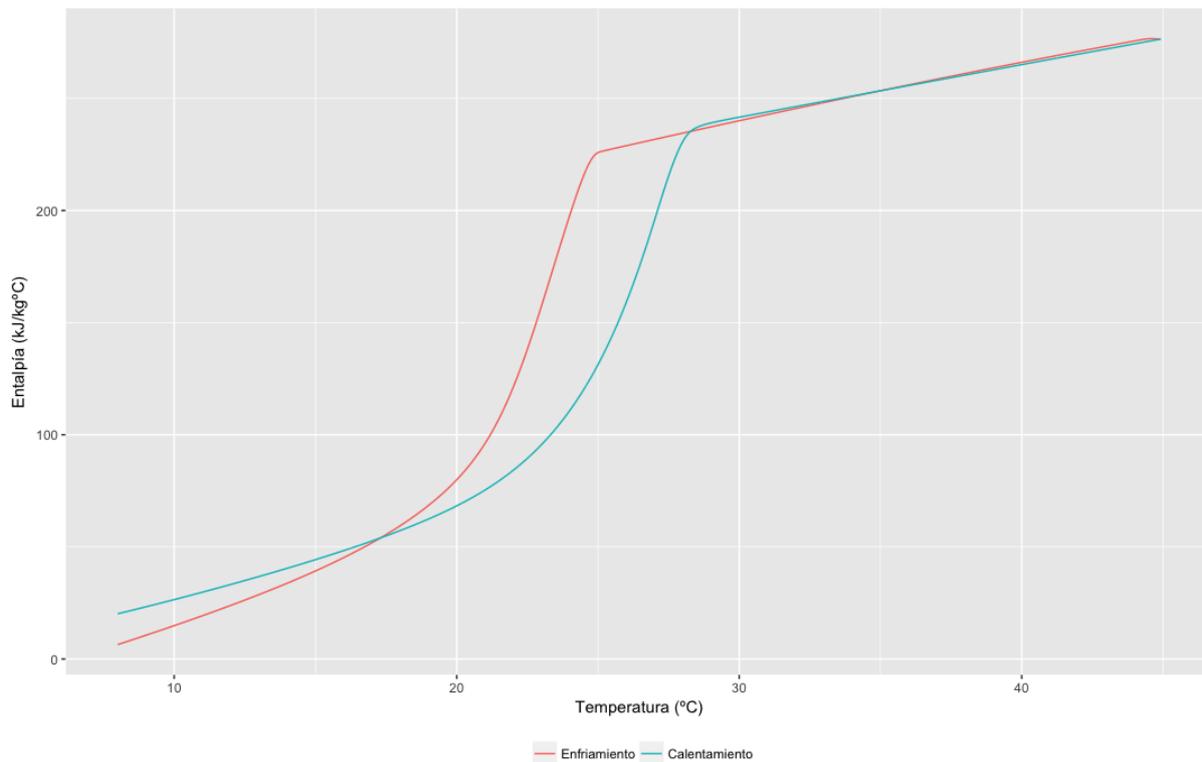


Figura 5.3: Curva DSC del material de cambio de fase del Energain

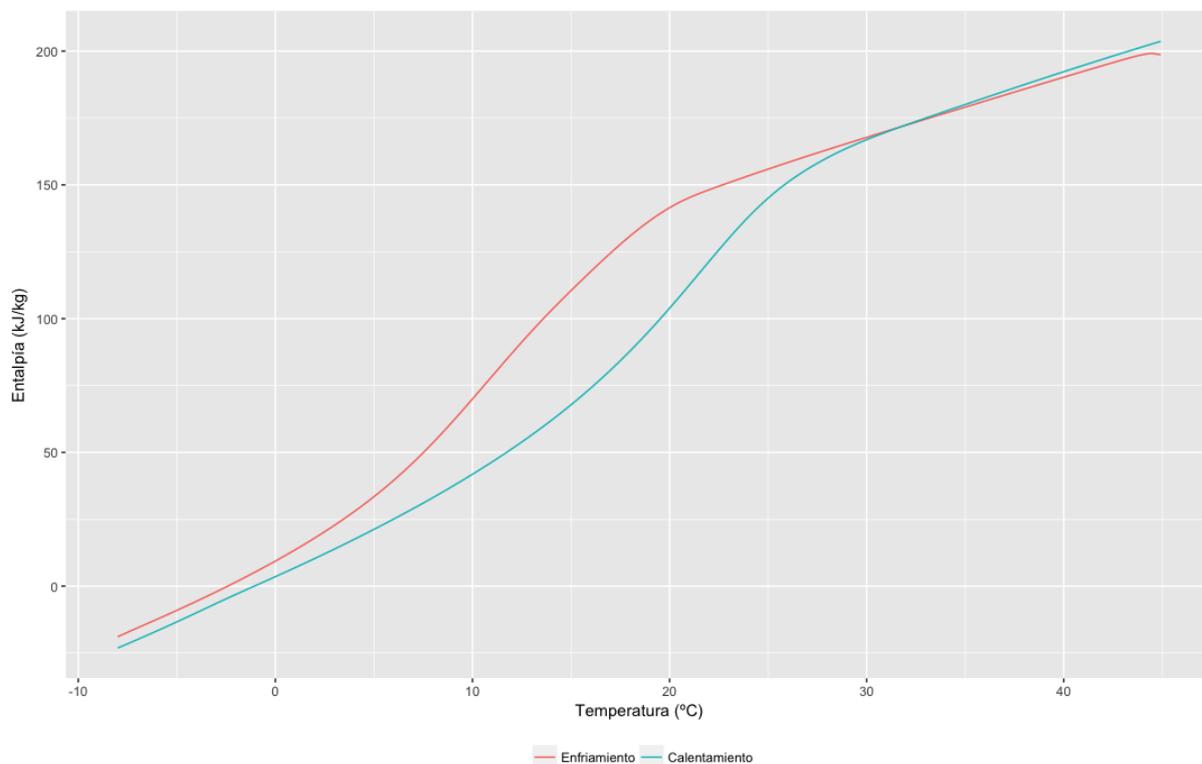


Figura 5.4: Curva DSC de la mezcla de copolímero y material de cambio de fase del Energain



## Capítulo 6

# Ensayo de Conductivimetro

---

6.1. Termiplast . . . . .	102
6.2. Energain . . . . .	103

---



El objetivo inicial del ensayo del conductivímetro es disponer de datos experimentales para la validación de los algoritmos de cálculo planteados posteriormente. Al mismo tiempo, y en el caso de los métodos indirectos, de aprendizaje automático, se emplearán los datos experimentales para entrenarlos. En este caso, se ha empleado un conductivímetro de la marca Netzsch, modelo HFM 436/6/1 Lambda.

## 6.1. Termiplast

En el caso del Termiplast, se ha aprovechado también para medir la conductividad en dos temperaturas distintas, de forma que en cada estado el PCM se encuentre completamente sólido o completamente líquido. Se ha fijado por lo tanto una temperatura de PCM sólido de 10 °C, y de PCM líquido de 40 °C. Los resultados de la determinación de la conductividad<sup>1</sup> se muestran en la tabla 6.1, para cada uno de los estados, junto con la temperatura media a la que se encontraba la muestra durante la medición. La medición de la conductividad se ha realizado mediante los sensores de temperatura y flujo con los que cuenta el propio conductivímetro.

Estado	T <sup>a</sup> media (°C)	Conductividad(W/m·K)
Sólido	10	0.131
Líquido	40	0.188

Tabla 6.1: Resultados de la determinación de conductividad

Durante el ensayo se han realizado dos ciclos completos de enfriamiento/calentamiento, y se han registrado los flujos de calor superficiales y las temperaturas de diferentes zonas de la muestra, mediante las sondas previamente descritas. Las temperaturas máxima y mínima de los ciclos, se han establecido para conseguir que todo el PCM en la probeta pase completamente de estado sólido a líquido y viceversa. El tiempo total de duración del ensayo ha sido de 2 días.

En cada una de las superficies exteriores se han dispuesto tres sensores de temperatura. En la figura 6.1 se puede observar la evolución de la temperatura para la superficie superior. Se puede observar que existe cierta diferencia entre la temperatura tomada en el centro de la muestra, y la de las otras dos sondas. Estas dos sondas están situadas en el borde de la probeta, como se puede observar en la imagen 4.2, por lo que han sido descartadas para los análisis posteriores, debido a la influencia que se presenta del efecto borde. Se encuentran además fuera del área de medición del conductivímetro<sup>2</sup>. Lo mismo sucede con la superficie inferior, con lo que sólo se van a tener en cuenta las temperaturas de las sondas centrales en cada superficie.

<sup>1</sup>Como ya se ha comentado con antelación, la precisión de la medida de conductividad es de  $\pm 1.5\%$

<sup>2</sup>Aunque el conductivímetro acepta muestras de dimensiones 600 mm x 600 mm, en realidad la medición de los flujos de calor y las temperaturas los realiza sólo en un cuadrado centrado de 400 mm x 400 mm. La medición se realiza de esta forma precisamente para minimizar los efectos de borde, y obtener un flujo de calor unidimensional en la zona de medida

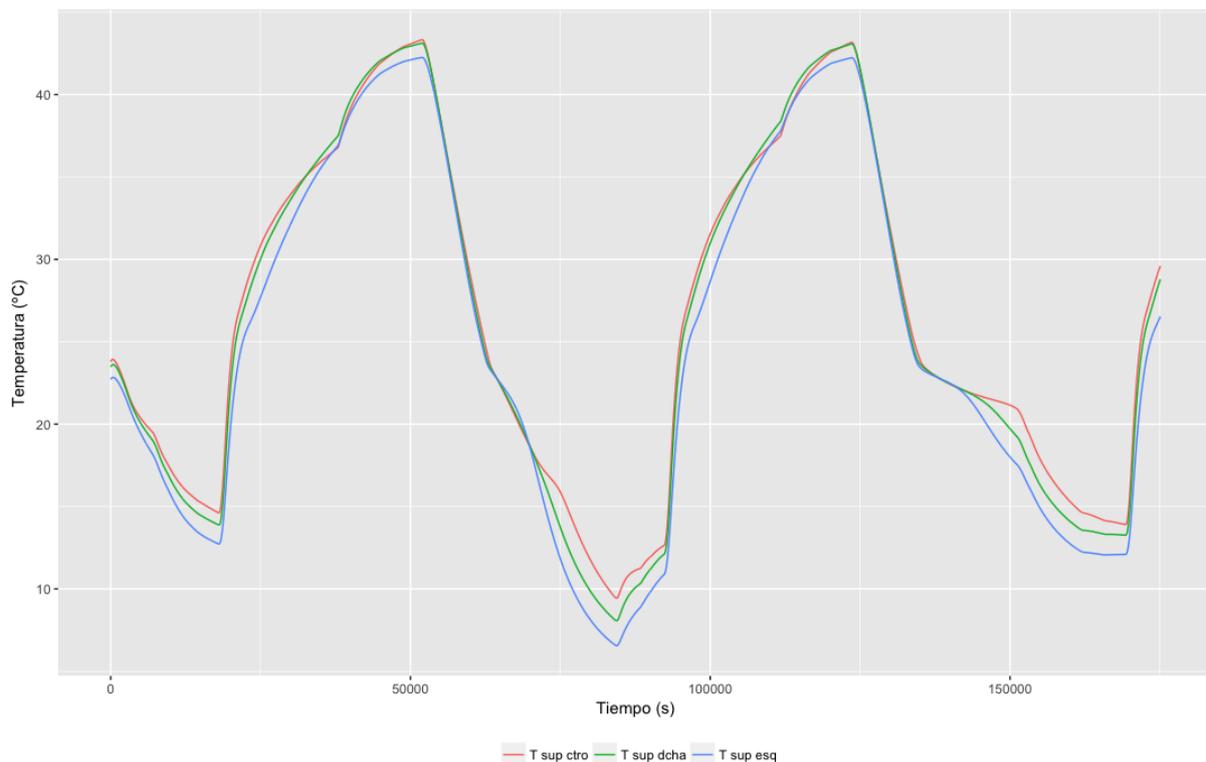


Figura 6.1: Evolución de temperaturas en la superficie superior

En la figura 6.2 se representan las temperaturas en las 5 zonas de medida a lo largo del espesor de la probeta. Se han representado las temperaturas de ambas superficies en línea continua, y las temperaturas interiores en línea punteada. Se puede observar el efecto de la inercia interna del PCM, en el cruce que experimentan las evoluciones de las temperaturas interiores con las superficiales. Este efecto resulta más notable durante el proceso de cambio de fase, en el que las temperaturas evolucionan de forma más lenta, debido al proceso de absorción/cesión de energía de forma casi isoterma.

Finalmente, en la figura 6.3 se representan los flujos de calor superficial. Junto con los flujos de calor, se ha representado también las temperaturas superficiales, en línea discontinua. Se puede apreciar correctamente el efecto del cambio de fase del PCM, como un cambio de pendiente en la evolución de la temperatura. De todos modos, este efecto se encuentra también en parte solapado por la variación de los flujos de calor superficiales. En el gráfico se ha señalado el cambio de fase más claro, puesto que corresponde a un flujo de calor relativamente constante en la superficie.

## 6.2. Energain

Con la idea de obtener una mayor cantidad de datos para validar de forma más precisa los métodos de cálculo a que se van a proponer, y para entrenar los métodos de aprendizaje automático, se ha diseñado un ensayo en varias etapas con el Energain, para obtener un mayor

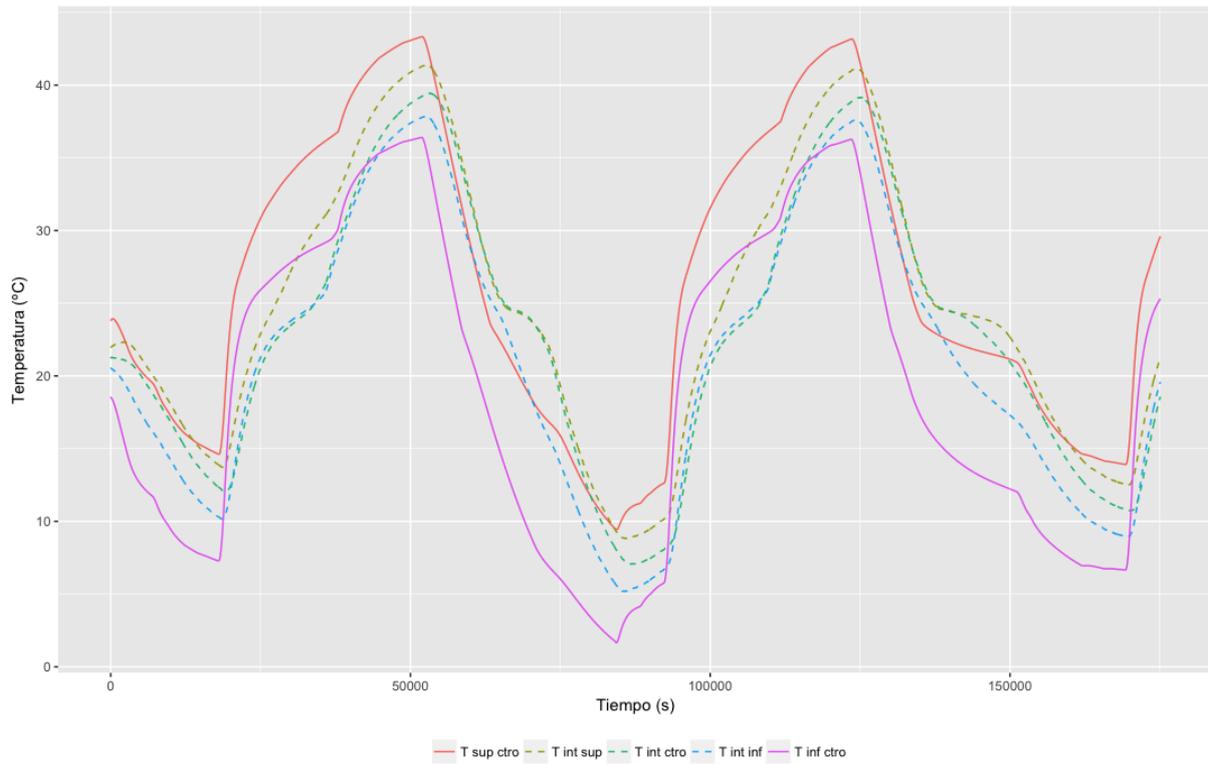


Figura 6.2: Evolución de temperaturas en el espesor de la probeta

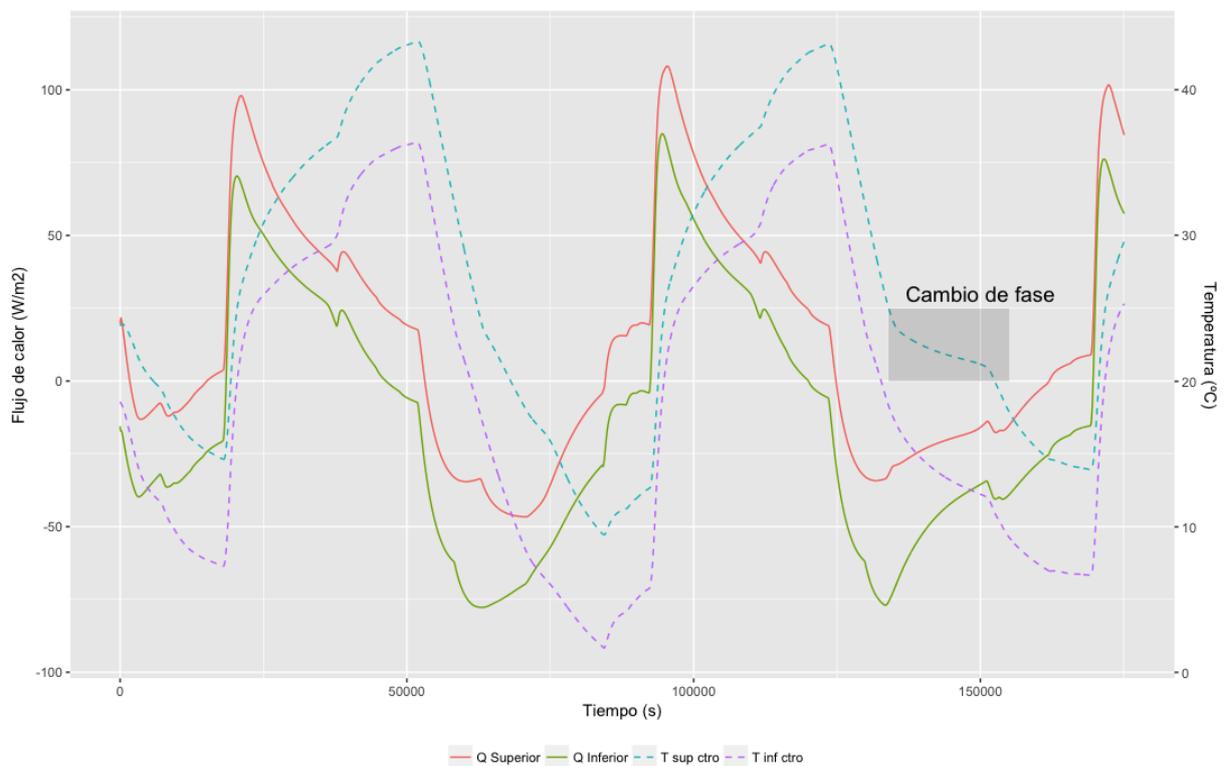


Figura 6.3: Evolución de flujos de calor en las superficies de la probeta

número de datos, en el que se van variando los saltos de temperatura y las temperaturas medias de la muestra, para obtener datos experimentales a distintas velocidades de calentamiento y enfriamiento, dentro de los rangos de temperatura habituales en el uso de este material. Como se ha comentado con anterioridad, este conductivímetro no permite ajustar las velocidades de calentamiento y enfriamiento de la muestra, sólo se puede fijar directamente la temperatura media de la muestra, y la diferencia de temperaturas entre ambas caras.

El material ensayado está diseñado para ser utilizado en la parte interior de los cerramientos, con una temperatura estable que va a estar en el rango de 20 - 25 °C, que en condiciones excepcionales como sobrecalentamientos o fallos de los sistemas de calefacción puede variar entre los 15 y los 30 °C. El sistema de control del conductivímetro permite asignar hasta 11 puntos de control consecutivos, con lo que se ha planteado dividir el ensayo inicialmente en dos fases, una que cubra los datos por encima de 20 °C, y otro que cubra los datos por debajo de 20 °C.

Las consignas de ambos ensayos se muestran en la tabla 6.2 para el ensayo 1 a temperaturas altas, y en la tabla 6.3 para el ensayo 2 a temperaturas bajas.

Nº	T <sup>a</sup> media (°C)	ΔT(°C)
1	25	10
2	27	14
3	30	10
4	35	10
5	30	10
6	27	14
7	25	10
8	20	10
9	35	10
10	35	20
11	25	10

Tabla 6.2: Consignas ensayo 1

Nº	T <sup>a</sup> media (°C)	ΔT(°C)
1	17	10
2	15	20
3	10	30
4	15	20
5	17	10
6	15	20
7	10	30
8	10	20
9	17	10
10	10	30
11	18	10

Tabla 6.3: Consignas ensayo 2

Para realizar el ensayo, se han añadido unas espumas a ambos lados del material, para mejorar el contacto con las superficies calefactora y enfriadora. Además, en pruebas iniciales realizadas con el material, se detectó que la cinta de cierre que se utiliza en los bordes provoca un puente térmico, que unido a la baja resistencia térmica relativa de la muestra, aconsejan reducir el flujo de calor, objetivo que se consigue también con las espumas. En la imagen 6.4 se puede observar la muestra dentro del conductivímetro con las espumas<sup>3</sup>. Como efecto adicional, esta configuración permite que la muestra evolucione más libremente que si estuviera en contacto directo con las placas, que imponen unas temperaturas determinadas en cada cara.

En las figuras 6.5 y 6.6 se puede observar la evolución de temperaturas y flujos de calor

<sup>3</sup>Por este motivo, el salto de temperatura a ambos lados de la muestra es comparativamente menor al que se observa en el ensayo anterior con el Termiplast23, en el apartado 6.1



Figura 6.4: Muestra ensayada dentro del conductivímetro

en la muestra durante los dos ensayos, realizados con temperaturas de las tablas 6.2 y 6.3. El ensayo 1 tuvo una duración total de 116.4 horas, mientras que el ensayo 2 tuvo una duración de 70.8 horas.

Además de estos dos ensayos, durante la realización del segundo se produjo un fallo que ha dado lugar a datos adicionales. En la figura 6.7 se ha representado la evolución de un ensayo que se interrumpió de manera inesperada, y que vamos a llamar ensayo 3. Dicho ensayo usaba como consignas las mismas que el ensayo 2, y tuvo una duración de 14.6 horas. De esta forma, se cuenta con más de 200 horas de ensayo sobre el material para analizar el comportamiento de los métodos de cálculo.

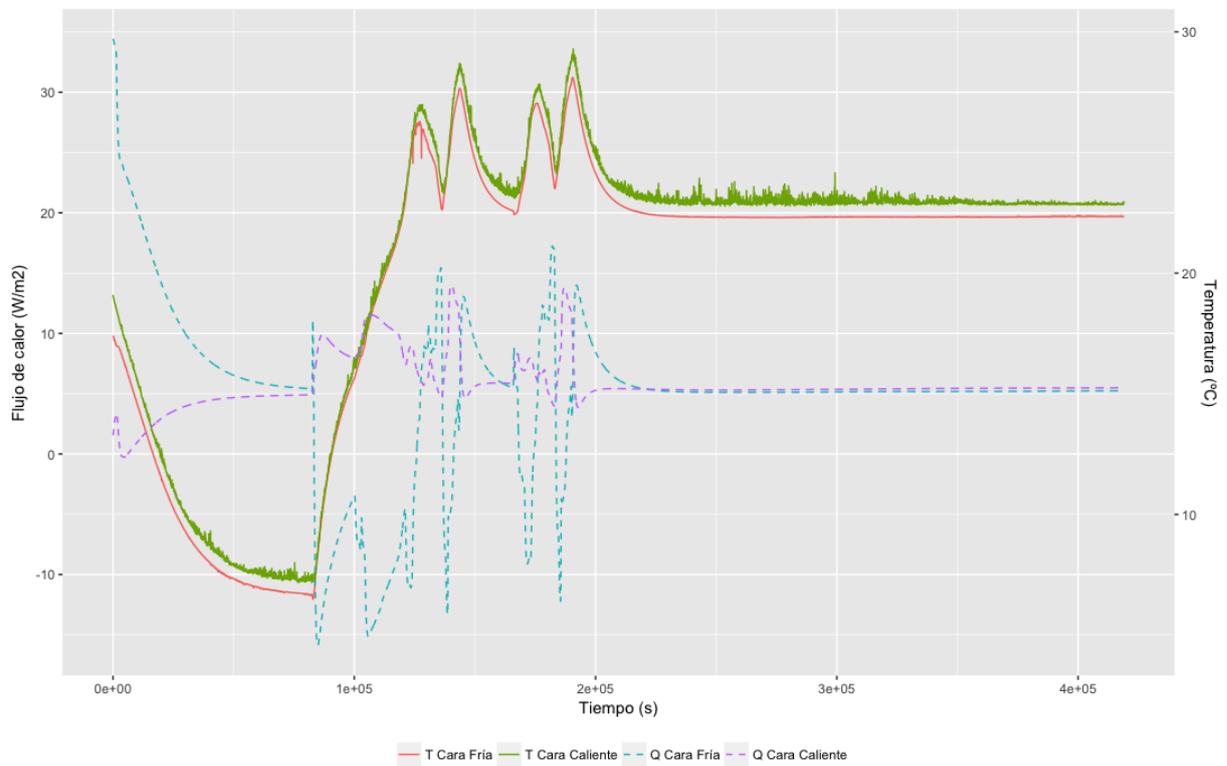


Figura 6.5: Evolución de temperaturas y flujos de calor en los ensayos de Energain en el conductivímetro en el ensayo 1

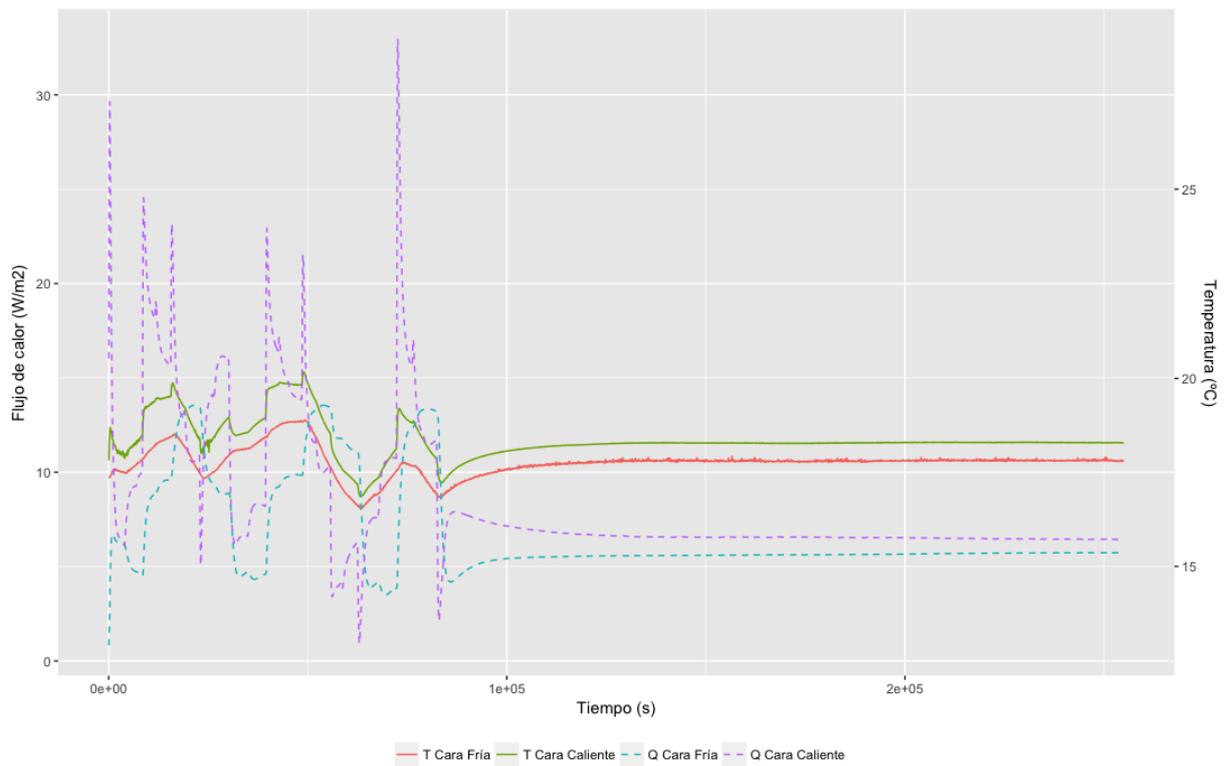


Figura 6.6: Evolución de temperaturas y flujos de calor en los ensayos de Energain en el conductivímetro en el ensayo 2

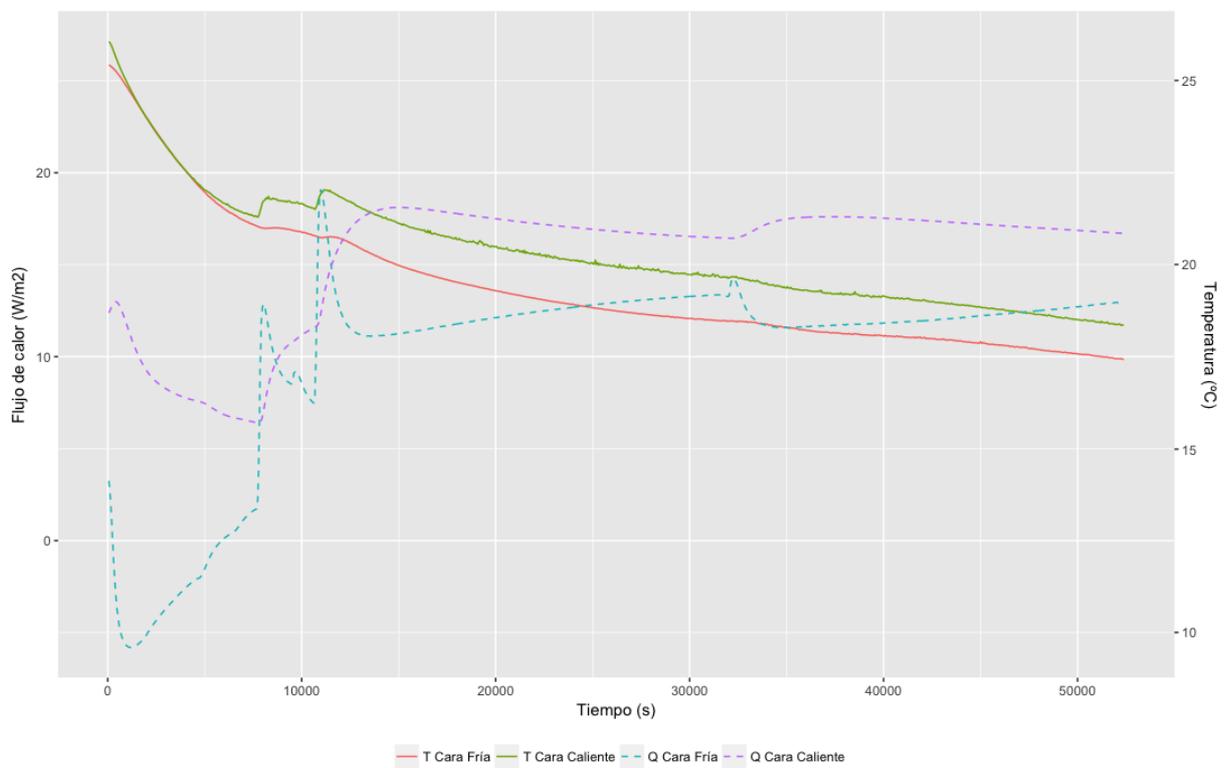


Figura 6.7: Evolución de temperaturas y flujos de calor en los ensayos de Energain en el conductivímetro en el ensayo 3



## **Parte III**

# **Métodos de simulación**



## Capítulo 7

# Método en Diferencias Finitas

---

<b>7.1. Elección del método en diferencias finitas . . . . .</b>	<b>114</b>
<b>7.2. Algoritmo explícito, método de entalpía . . . . .</b>	<b>115</b>
<b>7.3. Validación del algoritmo en diferencias finitas . . . . .</b>	<b>116</b>
7.3.1. Termiplast . . . . .	116
7.3.2. Energain . . . . .	123
<b>7.4. Conclusiones . . . . .</b>	<b>128</b>

---



Como se ha mencionado en el capítulo de Objetivos y Metodología (capítulo 3), en el presente trabajo se van a presentar dos métodos distintos para el análisis del comportamiento de los materiales de cambio de fase, para poder comparar su comportamiento, y elegir el más adecuado para el estudio. En el presente capítulo, se analiza el comportamiento de los métodos en diferencias finitas, comenzando por la elección y el desarrollo del método que se va a emplear, y pasando posteriormente a validar su comportamiento usando los datos experimentales de los ensayos realizados sobre el Termiplast y Energain, presentados en el capítulo 6.

## 7.1. Elección del método en diferencias finitas

Se desea analizar el comportamiento de un algoritmo en diferencias finitas para modelar el comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase. El objetivo es desarrollar un método de cálculo que combine un alto grado de exactitud, con una gran velocidad de cálculo, tal y como se explicó en el capítulo 3. Para hacer la selección se han tenido en cuenta las siguientes condiciones:

- Flujo de calor unidimensional: El algoritmo se va a emplear para el cálculo de flujo de calor a través de cerramientos de edificios, siendo en estos casos habitual la asunción de flujo de calor unidimensional.
- Material homogéneo: para poder usar propiedades térmicas únicas para toda la capa de PCM. Caso de que el material sea heterogéneo<sup>1</sup>, se podrán emplear propiedades medias.
- Ausencia de convección en la fase líquida: esto posibilita el uso del mismo método de cálculo para la fase líquida y sólida. Caso de que exista convección en la fase líquida, se podrá usar una conducción equivalente como ya se ha explicado previamente en el capítulo 2.
- PCM no puro: El cambio de fase ocurre en un intervalo de temperaturas finito, y no de forma isoterma como en el caso de los materiales puros.
- Siguiendo el modelo habitual en los cálculos de transferencia de calor a través de cerramientos<sup>2</sup>, el algoritmo de cálculo tendrá que ser capaz de calcular los flujos de calor superficiales, partiendo de la evolución de temperaturas en cada una de las superficies.

Entre las diferentes opciones disponibles para el desarrollo de este modelo, tal y como se explicó en el capítulo 2, se ha optado por un algoritmo en diferencias finitas, por el método de entalpía, y explícito. La propuesta es partir de un modelo de cálculo relativamente sencillo, para mejorarlo en caso de que se considerase necesario. Los motivos de esta elección son los siguientes:

<sup>1</sup>Como sucede realmente con el material ensayado, Termiplast 23, que es una mezcla de yeso y PCM

<sup>2</sup>Factores de respuesta y CTFs

- Diferencias finitas: De entre los métodos descritos, no existe la posibilidad de encontrar una solución analítica que se ajuste a PCM's no puros. Por lo tanto es necesario recurrir a métodos de discretización<sup>3</sup>. De entre las posibilidades existentes en este área se ha optado por el método de diferencias finitas, que da buenos resultados en geometrías sencillas como las que vamos a analizar, manteniendo al mismo tiempo la sencillez de cálculo.
- Método de entalpía: Se elige este método porque no necesita delimitar el PCM en diferentes regiones en función de su estado, con lo que se puede usar la misma ecuación en todo el cuerpo. Al mismo tiempo, se ha optado por la entalpía y no el calor efectivo para evitar los problemas que presenta en el calor efectivo, que ya se han comentado en el capítulo 2.
- Esquema explícito: Este esquema combina la sencillez de cálculo, sin la necesidad de aplicar métodos iterativos de resolución, con un buen control de errores mediante la elección del intervalo de diferenciación<sup>4</sup>.

## 7.2. Algoritmo explícito, método de entalpía

Partiendo de la ecuación de difusión de calor (ecuación 2.2), si se diferencia mediante el método de diferencias finitas y de forma unidimensional, se obtiene, para un nodo interior:

$$h_i^{n+1} = h_i^n + \frac{\Delta t}{\rho \Delta x^2} [k_-^n (T_{i-1}^n - T_i^n) + k_+^n (T_{i+1}^n - T_i^n)] \quad (7.1)$$

Para los nodos superficiales la resolución es inmediata, puesto que se fija como condición de contorno la temperatura superficial, con lo que se obtiene la entalpía correspondiente sin más que usar la relación entalpía-temperatura obtenida del ensayo del DSC.

Con respecto a las propiedades a incluir en el algoritmo, se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Densidad: Se considera constante. Si bien en los PCM se suele dar una variación de volumen durante el cambio de fase, al estar microencapsulado y mezclado en un material poroso en el caso del Termiplast, y estabilizado por la mezcla con un copolímero en el caso del Energain, no se aprecia un cambio de volumen del conjunto, con lo que la densidad se mantiene constante.
- Conductividad: Se han incluido distintos valores para ambos estados, líquido y sólido, y una conductividad variable lineal entre ambos valores durante el cambio de fase. Si-

<sup>3</sup>También se puede recurrir a los métodos indirectos, pero esto se va a describir en el apartado 8.1

<sup>4</sup>Durante el desarrollo de este modelo, se ha probado también con el esquema de Crank-Nicolson, y con el esquema implícito. La necesidad de realizar múltiples iteraciones para cada instante de tiempo, sobre todo en los momentos en los que el material se encuentra en zona de cambio de fase, provocaba un aumento importante del tiempo de cálculo, por lo que se ha descartado su uso, y no se ha llegado siquiera a la fase de validación del método



guiendo la recomendación de Patankar [107], se evalúa una conductividad equivalente para el cálculo en cada nodo hacia la izquierda y derecha de la siguiente forma:

$$k_-^n = \frac{2k_{i-1}^n k_i^n}{k_{i-1}^n + k_i^n} \quad k_+^n = \frac{2k_{i+1}^n k_i^n}{k_{i+1}^n + k_i^n} \quad (7.2)$$

- Para la relación entre temperatura y entalpía, se usan los datos obtenidos del ensayo de DSC de cada uno de los materiales, que se han presentado en el capítulo 5.
- El uso del esquema explícito para el cálculo del campo de temperaturas requiere tener en consideración el criterio de estabilidad:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x^2} \frac{k}{\rho c_{eff}} \leq 1/2 \quad (7.3)$$

Siendo  $c_{eff}$  el cociente de la entalpía y la temperatura.

Adicionalmente, se calcula el flujo de calor superficial en cada una de las caras de la probeta, usando para ello la formulación en diferencias finitas de la ecuación de Fourier para la conducción:

$$q_{sup} = k_+ \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad q_{inf} = k_- \frac{T_{N-1} - T_N}{\Delta x} \quad (7.4)$$

Estas ecuaciones se han programado usando el lenguaje Fortran, para poder realizar todas las simulaciones necesarias, y comprobar la adecuación del método desarrollado usando los datos experimentales disponibles. En el siguiente apartado se detallan los resultados obtenidos.

### 7.3. Validación del algoritmo en diferencias finitas

Se han usado los datos experimentales de los ensayos de conductivímetro para validar el método de diferencias finitas. Estos datos se han expuesto en el capítulo 6.

#### 7.3.1. Termiplast

Tal y como se ha explicado en el apartado 4.2.1, la probeta que se ha ensayado con Termiplast, posee un espesor de 70 mm, y se han dispuesto sensores de temperatura a distintos espesores, y fluxímetros para medir los flujos de calor en la superficie. Al disponer tanto de datos de temperatura en el interior de la probeta, como los flujos de calor superficiales, se han usado esos datos experimentales para analizar el ajuste de los resultados de simulación.

Además, para las propiedades del material necesarios en la simulación, se han empleado los valores que figuran en la tabla 7.1.

Además es necesario cumplir con el el criterio de estabilidad:

$$\Delta Fo = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \frac{k}{\rho c_{eff}} \leq 1/2 \quad (7.5)$$

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	678.94	kg/m <sup>3</sup>
Conductividad sólido	0.131	W/m·K
Conductividad líquido	0.188	W/m·K

Tabla 7.1: Propiedades de Termiplast

siendo  $c_{eff}$  el cociente de la entalpía y la temperatura.

El valor de  $c_{eff}$  varía con la fase en la que se encuentra el PCM, de manera que para asegurar que el criterio de estabilidad se cumple para todos los estados del PCM, se decide usar valores bajos del mismo, que corresponden con la fase líquida, con un valor de 1.067 kJ/kgK.

Además del criterio de estabilidad, es necesario considerar también que el error en la aplicación del esquema explícito es del orden de  $O(\Delta t + \Delta x^2)$ .

Teniendo en cuenta estos condicionantes, se ha empleado un intervalo temporal de 0.01 s, y un intervalo espacial de 0.005 m, que permite cumplir con el criterio de estabilidad<sup>5</sup>, y mantener el error en unos valores aceptables.

Para la relación entre temperatura y entalpía, se han usado los valores obtenidos en el ensayo de DSC descrito en el apartado 5.1. El Termiplast, como es habitual en las parafinas, presenta una cierta histéresis entre el calentamiento y el enfriamiento. Para facilitar la aplicación del método de diferencias finitas, se va a usar una curva media entre el calentamiento y el enfriamiento, tal y como se muestra en el gráfico 7.1<sup>6</sup>.

### 7.3.1.1. Temperaturas interiores de la muestra

Tal y como ya se ha explicado, el algoritmo utiliza la ecuación 7.1 para calcular la entalpía en cada uno de los nodos interiores de la muestra, usando para ello los valores de la temperatura del instante anterior:

$$h_i^{n+1} = h_i^n + \frac{\Delta t}{\rho \Delta x^2} [k_-^n (T_{i-1}^n - T_i^n) + k_+^n (T_{i+1}^n - T_i^n)]$$

Una vez obtenida la entalpía, emplea la relación entalpía-temperatura obtenida de la medición en DSC para hallar las temperaturas correspondientes de cada nodo, en el nuevo instante  $n + 1$ . Como condición de contorno se emplea directamente la temperatura superficial de la muestra, en cada una de sus caras.

Para comparar los resultados de la simulación en cuanto a temperaturas, se ha decidido emplear en exclusiva el nodo central, al ser este el más alejado de las condiciones de contorno superficiales, y por lo tanto en el que más se debería apreciar una desviación con respecto a las condiciones impuestas en la superficie..

<sup>5</sup>  $\Delta Fo = 0.104$

<sup>6</sup> Se ha comprobado previamente que los resultados de la simulación no varían significativamente al aplicar una curva u otra, siempre y cuando se mantenga el mismo calor latente total

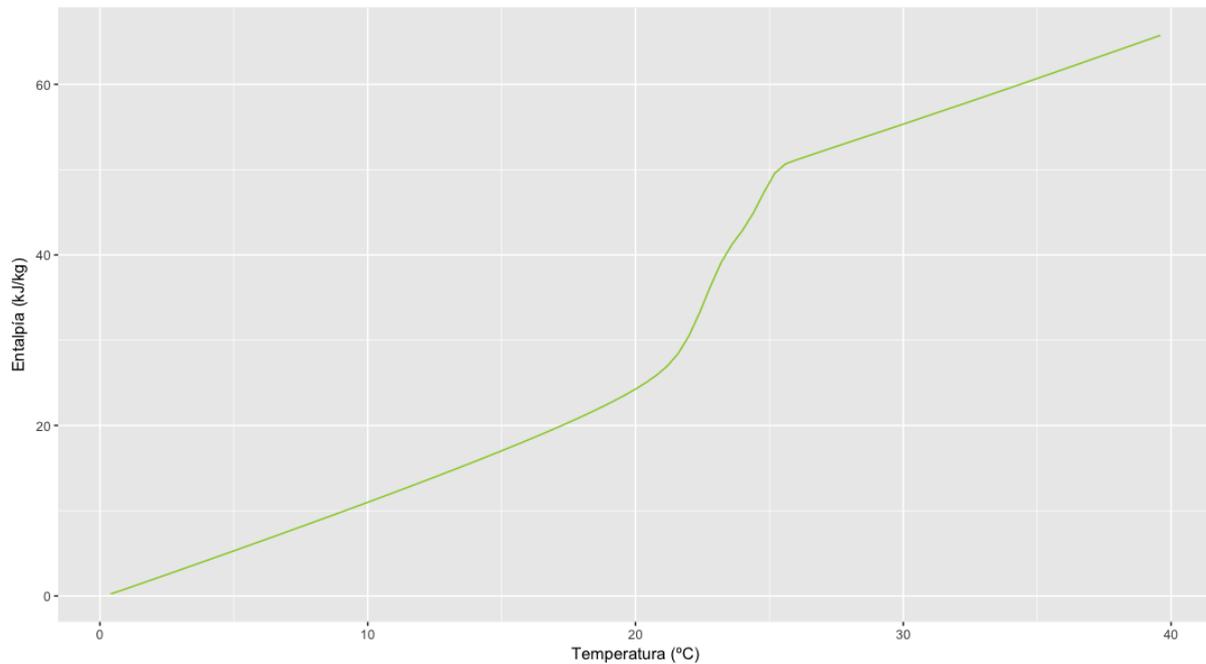


Figura 7.1: Curva Entalpía-Temperatura media total Termiplast

En la figura 7.2 se muestran los datos experimentales del ensayo del conductivímetro, junto con los resultados del algoritmo en diferencias finitas.

Como se puede observar, el ajuste entre los datos de la simulación y los experimentales es bastante bueno, existiendo sólo cierto desfase durante los procesos de cambio de fase, sobre todo la fusión, en la que se puede apreciar cierto retardo en iniciarse el cambio de fase. El error medio se estima en  $\pm 1.1$  °C, lo que significa el 4.9 % de la temperatura media del ensayo, o un 3.3 % de la variación total de temperaturas durante el mismo.

Como se ha comentado con anterioridad, en estas simulaciones se está empleando la curva media de cambio de fase. Se ha comprobado el posible aumento del ajuste al emplear las curvas reales de fusión y solidificación obtenidas mediante DSC (Apartado 5.1) pero se ha obtenido una mejora de los resultados mínima. Teniendo en cuenta que la consideración de curvas diferenciadas de fusión y solidificación complican de manera notable el algoritmo, y al mismo tiempo no suponen una mejora significativa en los resultados, se ha mantenido la curva media para el cálculo.

### 7.3.1.2. Flujo de calor superficial

Además de usar el campo de temperatura interior para validar el algoritmo, se ha usado el cálculo de los flujos de calor superficiales, mediante las ecuaciones 7.4:

$$q_{sup} = k_+ \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad q_{inf} = k_- \frac{T_{N-1} - T_N}{\Delta x}$$

Con estas ecuaciones se han calculado los flujos de calor en ambas superficies y se han

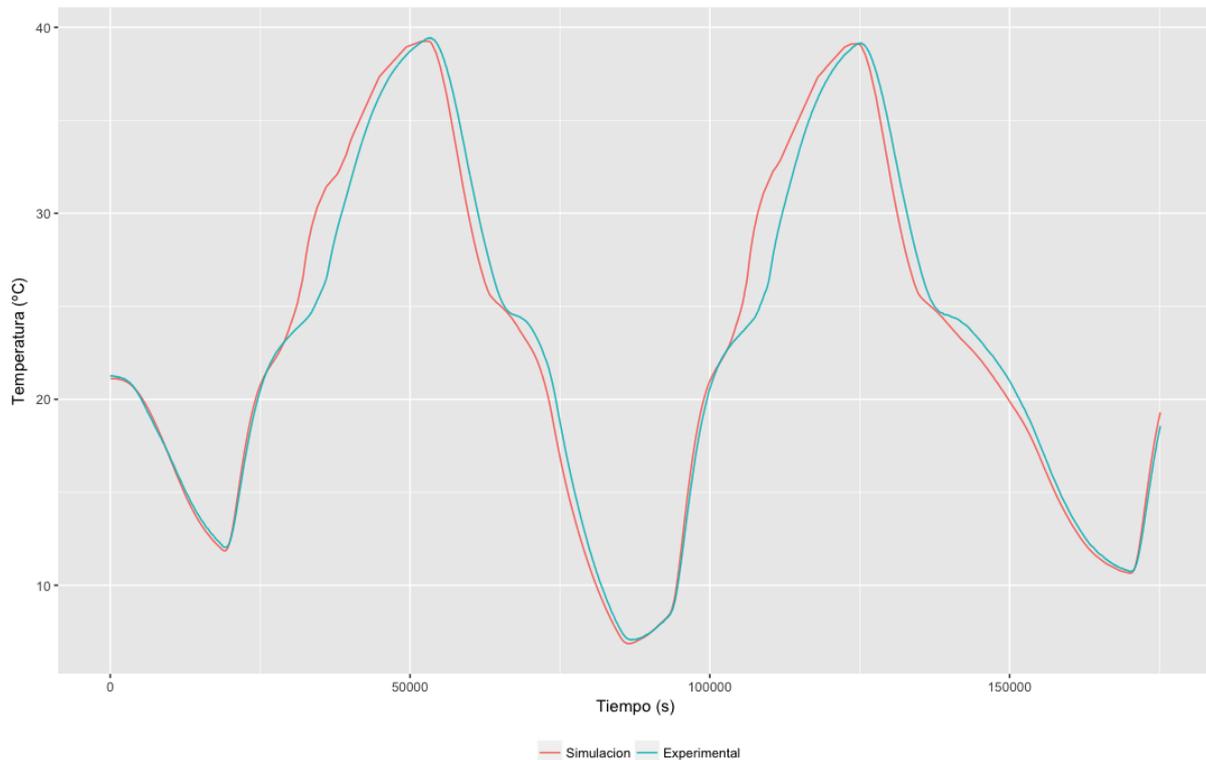


Figura 7.2: Comparativa de temperaturas para el nodo central

comparado con los medidos durante el ensayo. En la figura 7.3 se representan conjuntamente los flujos superficiales simulados y los experimentales medidos durante el ensayo.

Como se puede observar de los resultados de la simulación, el ajuste entre los datos simulados y los experimentales es bastante bueno, excepto durante el cambio de fase, en el que de nuevo se produce una mayor separación. Esto concuerda con los resultados obtenidos para las temperaturas del centro de la muestra, que también se desviaban en mayor medida durante el proceso de cambio de fase. Aún así, el error medio durante la simulación se sitúa en  $\pm 5.7 \text{ W/m}^2$ , un 3% de la variación total de flujo, con lo que se considera como una variación aceptable. Como curiosidad, el ajuste del flujo de calor para la superficie superior es mucho mejor que para la inferior, lo que teniendo en cuenta que las ecuaciones son las mismas en ambos lados, se podría deber a heterogeneidades en la probeta ensayada.

### 7.3.1.3. Sensibilidad del algoritmo

Como se puede observar del análisis anterior, los resultados de la simulación presentan un ajuste razonable para el tipo de cálculos que estamos realizando. Los errores relativos se mantienen por debajo del 5%. Hay que añadir que estos resultados se obtienen con un algoritmo de cálculo sencillo, con lo que se aúnan el grado de exactitud con la economía de cálculo.

Se ha analizado también la influencia que presenta la incertidumbre en la obtención de las

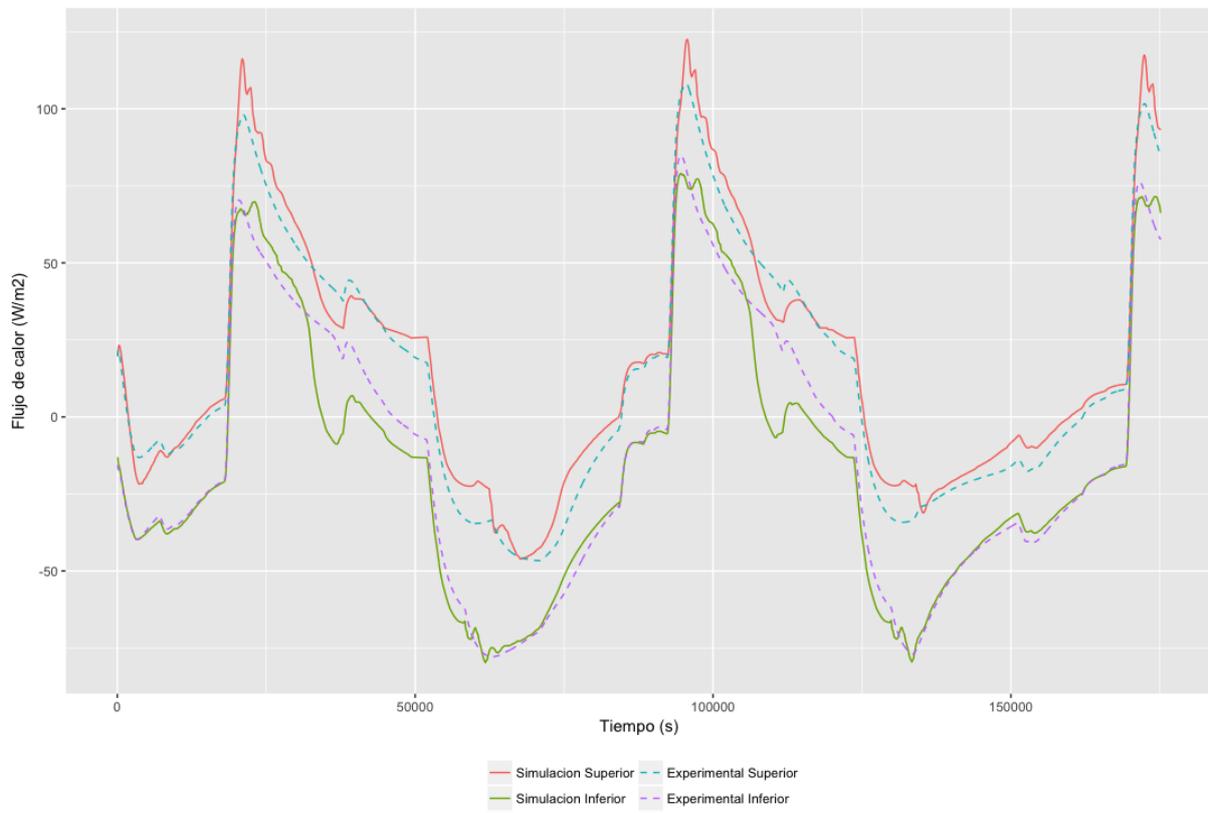


Figura 7.3: Flujos de calor superficial experimentales y simulados

variables de cálculo en el resultado de las simulaciones. La incertidumbre en las mediciones de las diferentes propiedades y variables se ha resumido en la tabla 7.2.

Propiedad	Incertidumbre
Entalpía (DSC)	0.2 °C
Densidad	5 %
Conductividad	1.5 %
Temperatura superficial	0.2 °C

Tabla 7.2: Incertidumbres en la medición de propiedades

Para empezar, se ha realizado un análisis de la sensibilidad de este algoritmo ante la incertidumbre en la determinación de cada variable que se emplea en el mismo, evaluando para ello la desviación media que se obtiene en la temperatura central y en los flujos de calor superficial. Para ello se ha recalculado tanto el campo de temperaturas como los flujos superficiales al hacer variar los valores de cada propiedad en el rango de incertidumbre. En la tabla 7.3 se pueden ver los resultados obtenidos de este análisis.

Propiedad	Incertidumbre	Temp Central (°C)		Flujo Sup (W/m <sup>2</sup> )	
		Media	Máxima	Media	Máxima
Conductividad	±1.5 %	0.05	0.28	0.37	2.53
Densidad	±5 %	0.17	0.86	1.55	8.87
Entalpía	±0.2°C	0.07	0.50	0.45	5.80
T <sup>a</sup> Cont	±0.2°C	0.19	0.56	0.47	6.71

Tabla 7.3: Sensibilidad del algoritmo a las distintas variables

A primera vista, parece que el valor que presenta mayor sensibilidad desde el punto de vista del algoritmo es la densidad, al ser la propiedad que presenta mayor desviación en su resultado final. De todos modos, hay que tomar este dato con muchas precaución, al ser al mismo tiempo el que mayor incertidumbre presenta en su medición. A pesar de ello, se puede observar que el algoritmo presenta un buen comportamiento ante la incertidumbre en las mediciones, presentando en todo momento errores relativos muy bajos incluso comparando las desviaciones máximas, siempre por debajo del 5%.

Para observar mejor el efecto de estas incertidumbres en los resultados del algoritmo, se han representado de manera conjunta los resultados base de la simulación con el valor nominal obtenido de las medidas, junto con los valores máximos y mínimos obtenidos al introducir las diferentes incertidumbres de medida. Se han representando igualmente los valores experimentales medidos durante el ensayo, junto con la incertidumbre en su medición. En la figura 7.4 se ha representado la evolución de las temperaturas en el centro de la muestra, mientras que en la figura 7.5 se representan los flujos de calor en la superficie superior, y en la figura 7.6 los flujos de calor en la superficie inferior.

Como se puede observar, el algoritmo presenta una buena estabilidad en los cálculos, con

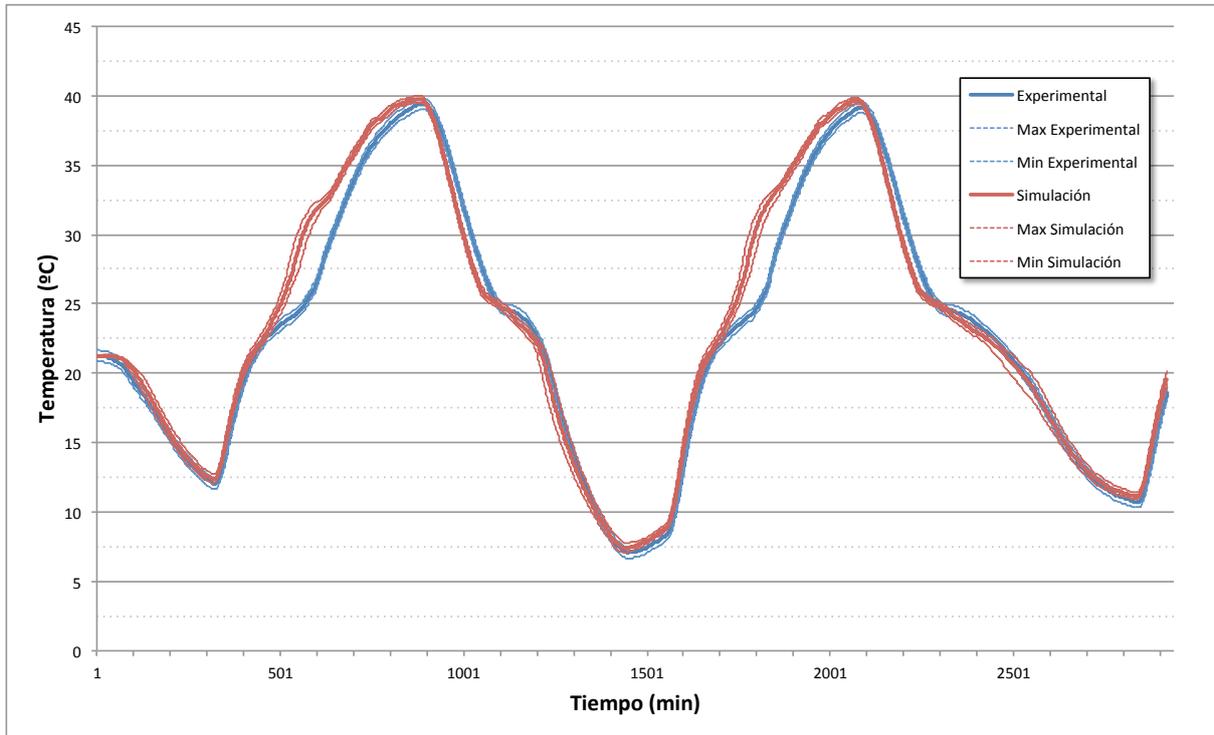


Figura 7.4: Sensibilidad de la temperatura central con las incertidumbres de medida

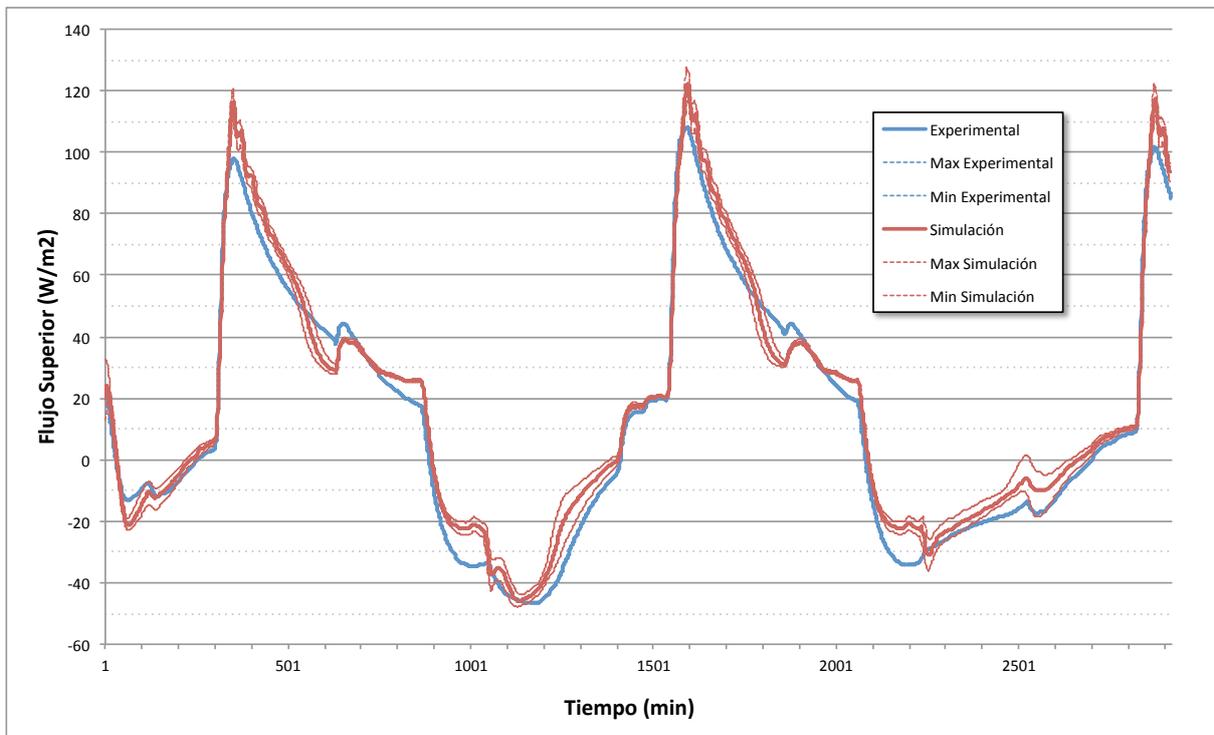


Figura 7.5: Sensibilidad del flujo superior con las incertidumbres de medida

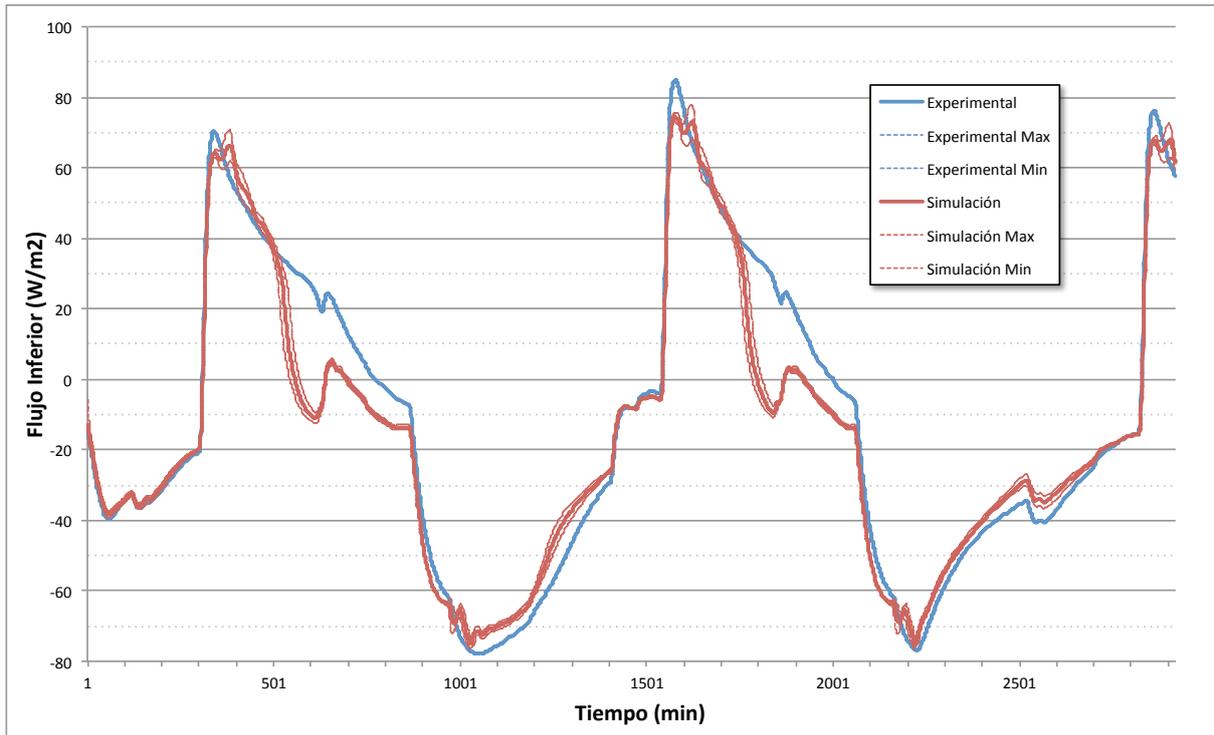


Figura 7.6: Sensibilidad del flujo inferior con las incertidumbres de medida

una reducida sensibilidad antes las incertidumbres de los valores de entrada.

### 7.3.2. Energain

Tal y como se ha comentado en el capítulo 6, además de ensayar el Termiplast en el conductímetro, se ha ensayado un segundo material, en este caso Energain de la marca Dupont, para disponer de más datos sobre los que validar los distintos métodos a desarrollar. Hay que aclarar que este segundo material se ha planteado ensayar posteriormente a la validación del método en diferencias finitas con Termiplast, y se propuso el ensayo de un segundo material con la idea de disponer de más datos para validar el método en redes neuronales que se presenta en el capítulo 8. A pesar de no haberse planteado el ensayo del Energain para validar el presente método, se ha decidido usar los datos experimentales para profundizar en el análisis de su comportamiento.

#### 7.3.2.1. Propiedades térmicas empleadas

La probeta que se ha ensayado con Energain, está formada por dos placas del material, con un espesor total de 10.4 mm, y se han dispuesto termopares y fluxímetros en cada una de sus superficies exteriores. Se han obtenido datos de tres ensayos sobre dicha probeta.

Además, para las propiedades del material necesarios en la simulación, se han empleado los valores que figuran en la tabla 7.4.



Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	432.69	kg/m <sup>3</sup>
Conductividad sólido	0.18	W/m·K
Conductividad líquido	0.14	W/m·K

Tabla 7.4: Propiedades de Energain

Además es necesario cumplir con el el criterio de estabilidad:

$$\Delta Fo = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \frac{k}{\rho c_{eff}} \leq 1/2 \quad (7.6)$$

siendo  $c_{eff}$  el cociente de la entalpía y la temperatura.

El valor de  $c_{eff}$  varía con la fase en la que se encuentra el PCM, de manera que para asegurar que el criterio de estabilidad se cumple para todos los estados del PCM, se decide usar valores bajos del mismo, que corresponden con la fase líquida, con un valor de 2.334 kJ/kgK.

Además del criterio de estabilidad, es necesario considerar también que el error en la aplicación del esquema explícito es del orden de  $O(\Delta t + \Delta x^2)$ .

Teniendo en cuenta estos condicionantes, se ha empleado un intervalo temporal de 0.01 s, y un intervalo espacial de 0.0026 m, que permite cumplir con el criterio de estabilidad<sup>7</sup>, y mantener el error en unos valores aceptables.

Para la relación entre temperatura y entalpía, se han usado los valores obtenidos en el ensayo de DSC descrito en el apartado 5.2. El Energain, como es habitual en las parafinas, presenta una cierta histéresis entre el calentamiento y el enfriamiento. En el caso concreto del Energain, además, presenta un intervalo de cambio de fase muy amplio, que se alarga desde los 0°C hasta los 26°C aproximadamente. Para facilitar la aplicación del método de diferencias finitas, al igual que se ha hecho con el Termiplast, se va a usar una curva media entre el calentamiento y el enfriamiento, tal y como se muestra en el gráfico 7.7.

### 7.3.2.2. Análisis de los valores experimentales

Como se ha comentado con anterioridad, el ensayo en Energain se ha realizado con posterioridad a la validación del método de diferencias finitas, y se ha planteado para analizar el comportamiento de las redes neuronales. Por este motivo, no se han dispuesto de termopares intermedios para el análisis de la evolución de temperaturas internas, puesto que el planteamiento de las redes neuronales no requiere de esta información. A pesar de ello, y puesto que se disponía de esta información adicional, se ha planteado aprovecharla para profundizar en el análisis del comportamiento del método de diferencias finitas.

Al analizar los datos de los ensayos sobre el Energain (en la figura 7.8 se representa el resultado del primero de los ensayos), se observa ruido en las mediciones de temperatura, ruido

<sup>7</sup>  $\Delta Fo = 0.205$

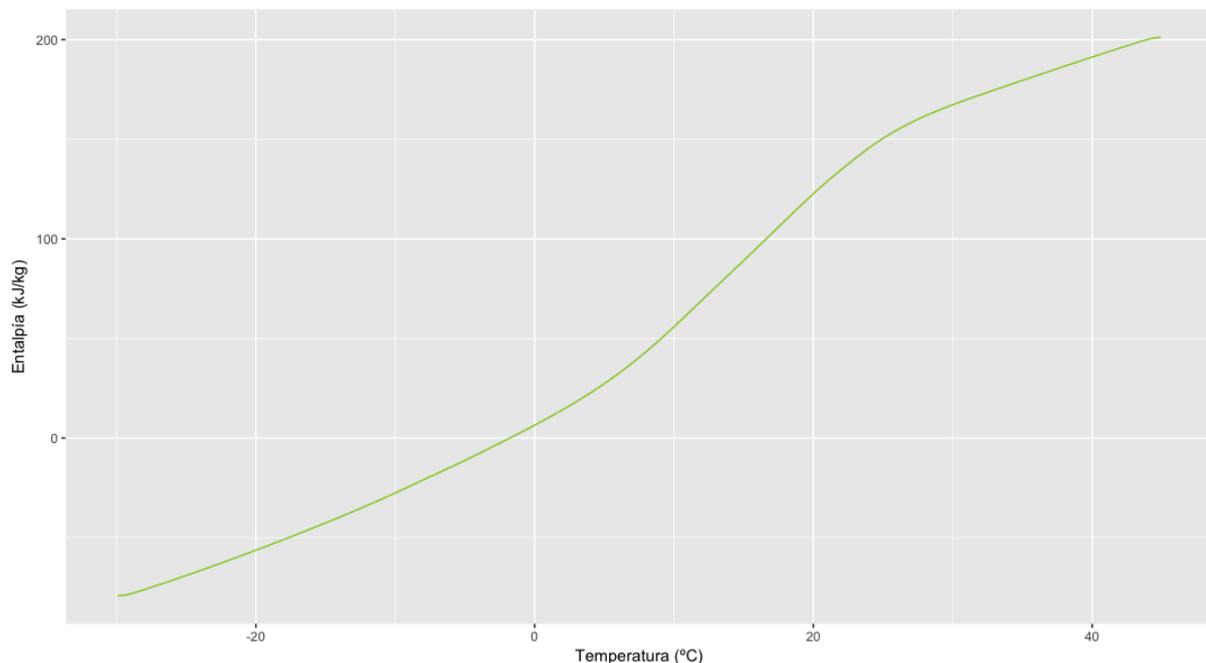


Figura 7.7: Curva Entalpía-Temperatura media Energain

que se incrementa hacia la parte media del ensayo. Este ruido no resulta problemático para las redes neuronales, puesto que presentan un comportamiento muy robusto ante pequeñas variaciones en los datos de entrada.

Sin embargo, al usar estos datos con el método de diferencias finitas, se observa que no sucede igual con este método, y es muy sensible ante este tipo de oscilaciones de los valores de entrada. En la figura 7.9 se muestran los datos experimentales de ensayo y los resultados de la simulación de la cara fría para el primer ensayo. Por su parte, en la figura 7.10 se muestran por su parte los resultados de la simulación sobre la cara caliente del mismo ensayo.

Como se puede observar de las figuras 7.9 y 7.10, el ruido presente en los datos de temperatura se transmite también a los datos de flujos de calor, en especial al flujo de calor de la cara caliente, que es a su vez el lado que presenta más ruido en la medición de temperaturas. No es extraño que la oscilación de los flujos de calor sea tan amplia en el lado caliente. Hay que tener en cuenta que el tamaño de la oscilación de las temperaturas provoca diferencias de temperatura que llegan incluso a triplicar la diferencia de temperaturas base sobre la que se produce la oscilación.

Aúsn así, de la evolución del flujo de calor del lado frío, se observa que los datos de la simulación son paralelos a los experimentales, aunque también se observa parte de ruido en los resultados obtenidos.

En vista de estos resultados, se decide analizar el posible origen del ruido presente en la medición de temperaturas. Para ello, se comienza por analizar el espectro de frecuencias de la temperatura del lado caliente, para determinar si el ruido presente proviene de alguna señal de alta frecuencia que pueda ser filtrada. La figura 7.11 muestra dicho espectro de frecuencias.

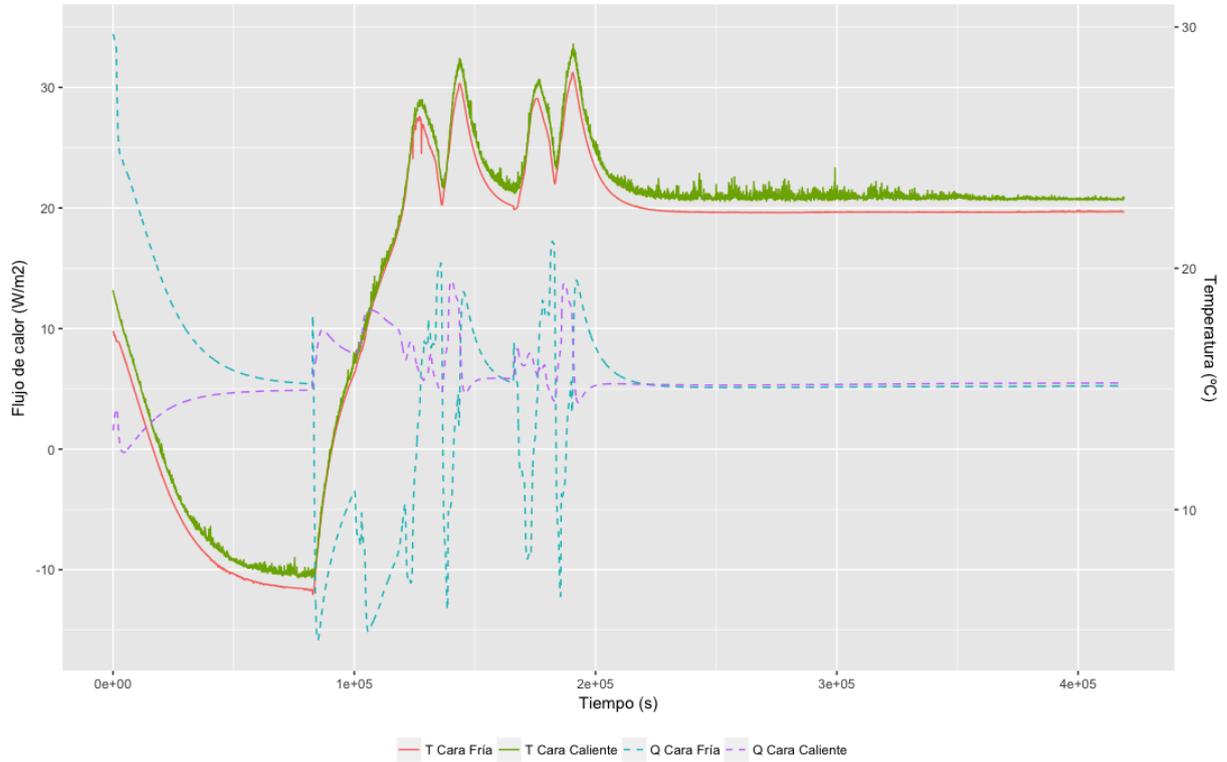


Figura 7.8: Ensayo 1 sobre Energain

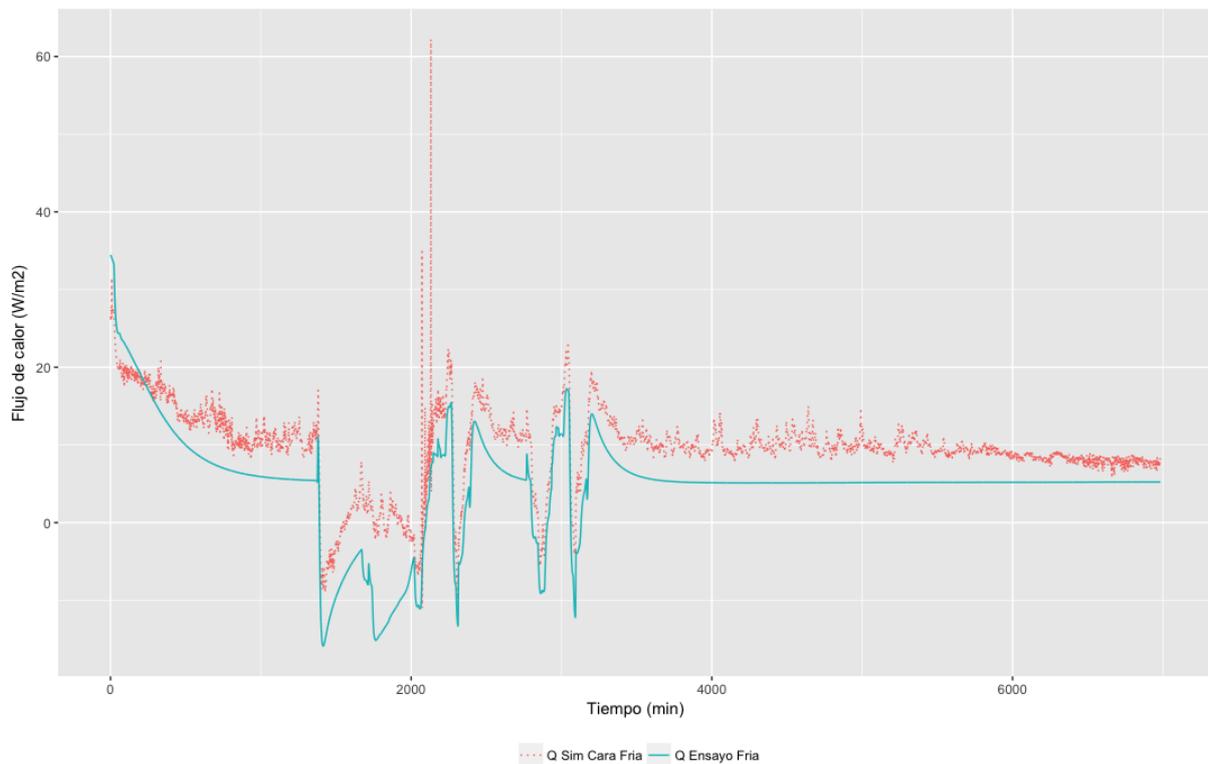


Figura 7.9: Simulación del ensayo 1 de Energain. Cara fría

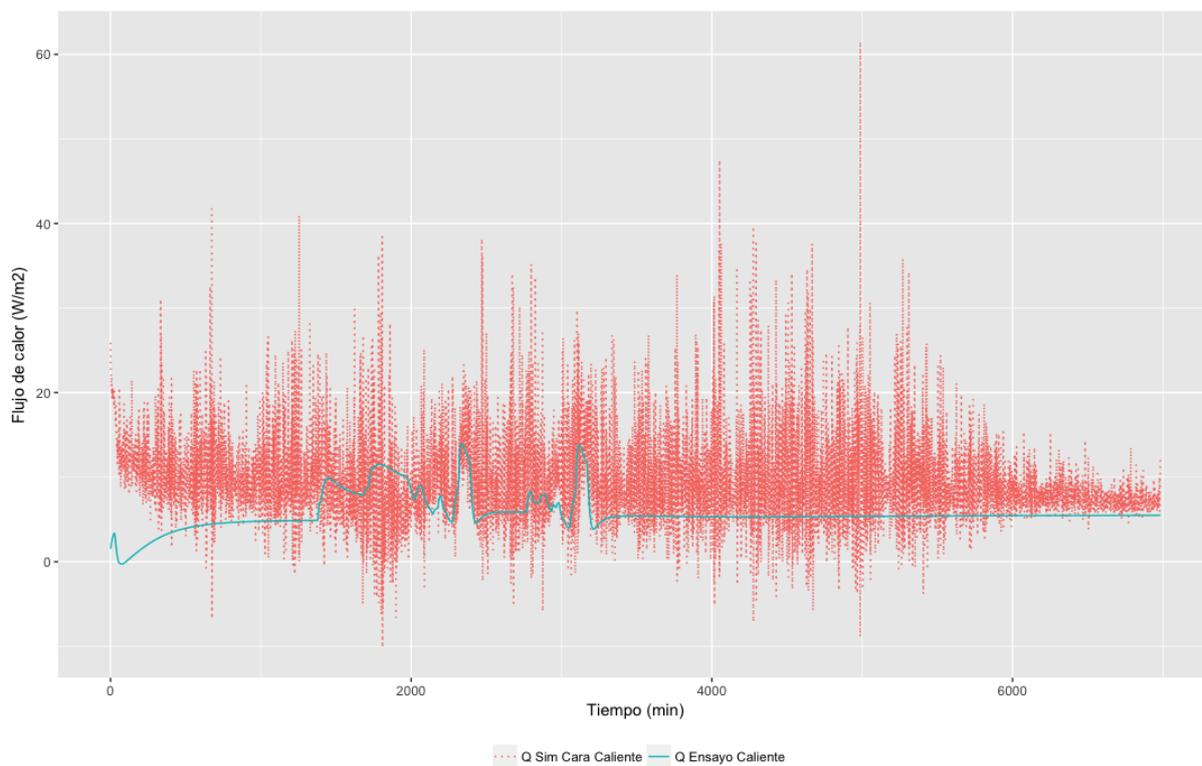


Figura 7.10: Simulación del ensayo 1 de Energain. Cara caliente

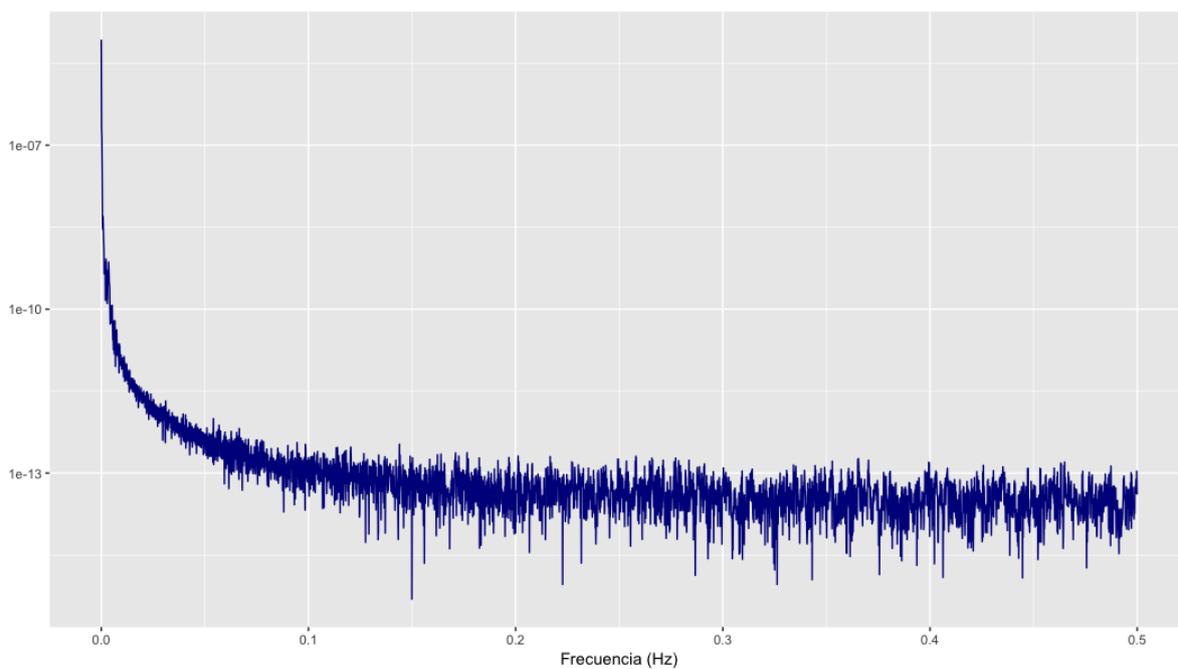


Figura 7.11: Espectro de frecuencias de temperatura del ensayo 1 de Energain. Cara caliente

Como se puede apreciar, el ruido presente aparece en todo el rango de frecuencias, y por lo tanto no resulta viable diseñar un filtrado por frecuencias. En lugar de esto, se ha optado por suavizar las variaciones en las temperaturas mediante el método de la media móvil, usando un intervalo de 11 minutos<sup>8</sup>.

Se ha utilizado este método de suavizado sobre el ensayo 3, que es el que presenta menor ruido en las mediciones de temperatura. Aplicando el método de diferencias finitas desarrollados sobre los datos de temperatura suavizados, se ha obtenido el resultado de simulación que se representa en la figura 7.12. Como se puede apreciar, el ajuste de los flujos de calor obtenidos es bastante bueno. El error máximo observado es de  $\pm 4.09 \text{ W/m}^2$ , siendo el error medio de  $\pm 0.36 \text{ W/m}^2$ . Este ajuste se encuentra dentro de los rangos asumibles para este método.

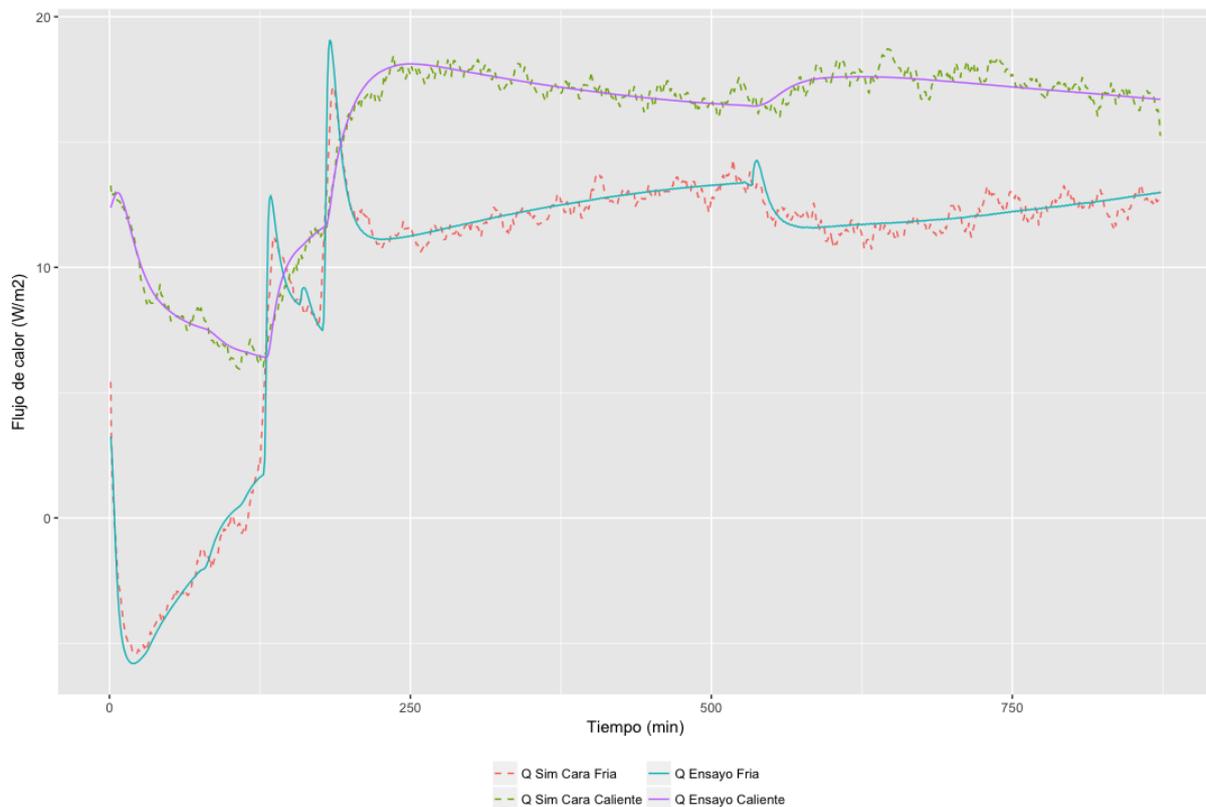


Figura 7.12: Resultado de la simulación mediante diferencias finitas usando los datos de temperatura suavizados del ensayo 3

## 7.4. Conclusiones

Se ha propuesto un algoritmo de cálculo para la simulación del comportamiento de los materiales de cambio de fase con cambio dinámico de temperaturas superficiales. Se ha realizado

<sup>8</sup>5 minutos a cada lado del valor a suavizar

también un ensayo experimental para validar la idoneidad del algoritmo, obteniéndose errores medios inferiores al 5 % tanto en la determinación de temperaturas, como en el cálculo de los flujos de calor superficial. Se ha analizado también la influencia de la incertidumbre en la medición de las propiedades termofísicas, y las condiciones de contorno, sobre los resultados finales de la simulación, encontrando también una buena estabilidad del algoritmo.

La mayor contrapartida de este algoritmo se encuentra en el dilatado tiempo de cálculo necesario para las simulaciones. A pesar de tratarse de un método explícito, que no precisa de métodos iterativos para la obtención de resultados en cada intervalo temporal, las limitaciones impuestas por el criterio de estabilidad, junto con el grado de exactitud que se quiere obtener, obligan a emplear intervalos temporales y espaciales muy pequeños.

Un problema adicional de este algoritmo es la poca versatilidad que presenta, al estar enfocado a la simulación de materiales homogéneos, en los que el PCM no presente convección en la fase líquida. Aún así, para el caso de aplicación propuesto, que es la inclusión de materiales de cambio de fase en la envolvente de edificios, estos condicionantes previos se cumplen en la mayoría de situaciones, con lo que se considera un algoritmo adecuado.



## Capítulo 8

# Método de Redes Neuronales

---

<b>8.1. Desarrollo de redes neuronales</b>	<b>132</b>
8.1.1. Aplicación al ensayo en conductivímetro	133
<b>8.2. Análisis de muro compuesto</b>	<b>136</b>
<b>8.3. Aplicación al ensayo de Termiplast</b>	<b>139</b>
8.3.1. Resultados del entrenamiento de la red neuronal	139
8.3.2. Análisis de sensibilidad y propagación de errores	141
8.3.3. Conclusiones	144
<b>8.4. Ensayo de Energain en conductivímetro</b>	<b>144</b>
8.4.1. Preparación para el entrenamiento de la red neuronal	145
8.4.2. Red neuronal con retroalimentación: red NARX	146
8.4.3. Red neuronal dinámica sin retroalimentación	150
8.4.4. Generalización de la red neuronal	162
<b>8.5. Conclusiones</b>	<b>165</b>

---



Además del enfoque habitual para el tratamiento del comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase, a través del método de diferencias finitas, desarrollado en el capítulo 7, en el presente trabajo se ha decidido analizar la posibilidad de emplear también métodos indirectos para modelizar el comportamiento de estos materiales. En concreto, se ha decidido emplear el método de redes neuronales, por tratarse de una técnica que se ajusta correctamente a la modelización de procesos no lineales, como es el cambio de fase en un PCM.

En el presente capítulo se va a describir el proceso de entrenamiento de las redes neuronales que se han empleado para la modelización del comportamiento de los dos materiales ensayados y ya descritos en el la parte II: Termiplast y Energain. Finalmente, y una vez entrenadas las redes y analizada su capacidad de ajuste a los datos experimentales de los ensayos, se han terminado simulando bajo condiciones de variación de temperatura diferentes a las condiciones del ensayo, para comprobar la capacidad de estas redes neuronales de simular el comportamiento de los materiales de cambio de fase en condiciones diferentes a las del ensayo.

## 8.1. Desarrollo de redes neuronales

El comportamiento fuertemente no lineal de los PCMs, especialmente durante el cambio de fase, dificulta en gran medida los cálculos a realizar. La alternativa más habitual para el tratamiento numérico de este tipo de problemas, ha sido la discretización de la ecuación de difusión del calor 2.2, como se ha hecho en el capítulo anterior. El tratamiento que se le da al cambio de fase, y la inclusión o no de otros elementos, como la histéresis durante el cambio de fase, o la presencia de convección en la fase líquida, ha dado lugar a gran cantidad de métodos de cálculo, como ya se comentó en el capítulo 2. Añadido a esto, y debido a que el error de cálculo va ligado al grado de discretización, el número de nodos necesarios para el cálculo en demasiadas ocasiones provoca un coste computacional elevado, y tiempos de cálculo excesivos. El problema además se vuelve prácticamente irresoluble si se quiere modelar el comportamiento de materiales compuestos heterogéneos, composites formados por materiales convencionales y materiales de cambio de fase.

Como una alternativa al método más habitual de diferencias finitas, se ha decidido profundizar en la posibilidad de aplicar métodos indirectos, de aprendizaje automático, y más en concreto, las redes neuronales para simular el comportamiento de los materiales de cambio de fase. La idea es partir de datos experimentales, para entrenar una red neuronal que permita calcular de forma adecuada el comportamiento térmico de estos materiales. Los principales motivos por los que se ha optado por este sistema son los siguientes:

- Su adecuación a los problemas no lineales
- Simplicidad de cálculo
- No es necesario hacer ninguna consideración o simplificación previa, la propia red de forma interna asigna el peso correspondiente a cada variable, y realiza las simplificaciones

que sean convenientes.

A la hora de aproximar funciones mediante redes neuronales, el enfoque más interesante es utilizar un perceptrón multicapa, con funciones de activación tipo sigmoide en las neuronas ocultas, y lineal en la capa de salida [182], como se puede observar en la imagen 8.1. Las neuronas de la capa oculta y la capa de salida, siguen el modelo del perceptrón de la imagen 8.2. Las operaciones que se realizan por lo tanto en cada neurona son:

$$a = f \left( \sum_{j=1}^R w_{i,j} p_j + b \right) \tag{8.1}$$

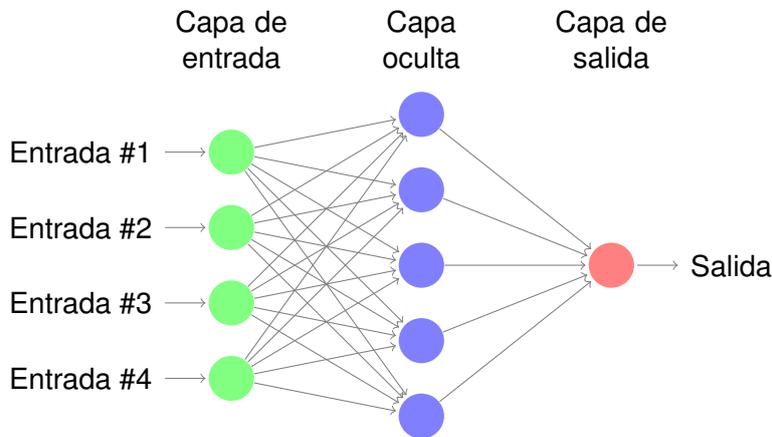


Figura 8.1: Esquema de perceptrón multicapa

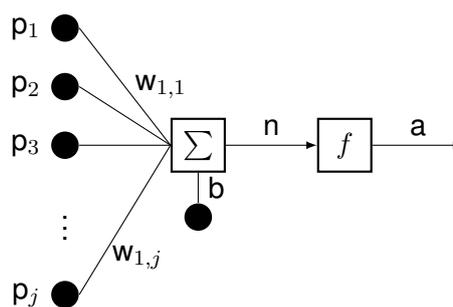


Figura 8.2: Neurona de entradas múltiples

A continuación se va a proceder a explicar el procedimiento seguido en este caso, para aplicar las redes neuronales al ensayo del conductivímetro.

### 8.1.1. Aplicación al ensayo en conductivímetro

Se desea determinar los flujos de calor superficiales de un PCM, en función de la variación de temperatura superficial en ambas caras. Se trata por lo tanto de analizar un problema

dinámico en el que los datos de entrada (temperaturas superficiales) y los de salida (flujos superficiales) son series temporales que van evolucionando en el tiempo. Este tipo de problemas se resuelven con lo que se denominan redes neuronales dinámicas, en la que los nodos de entrada están compuestos por una secuencia temporal de los datos de entrada, tal y como se puede apreciar en la imagen 8.3. Así, para definir la respuesta en cada momento, se emplean los datos de ese instante, más los de los estados anteriores. Por lo tanto, en el esquema de la figura 8.3 los datos de entrada van bajando por los nodos de entrada según avanza el tiempo.

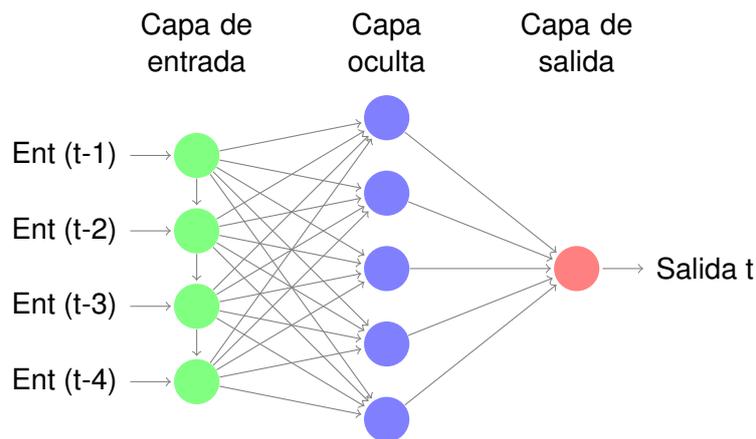


Figura 8.3: Esquema de red neuronal dinámica

Como variable de entrada se va a usar un vector con las series temporales de las dos temperaturas superficiales, y como variable de salida, el flujo de calor superficial. Aún así, hay que analizar los siguientes elementos para definir la red neuronal:

- Número de elementos de temporales en la entrada: Como se puede observar en el esquema de la red dinámica (figura 8.3), la red realmente es alimentada por una secuencia temporal definida de los valores de entrada. El número de elementos a incluir por cada una de las variables de entrada es desconocido a priori, con lo que habrá que probar con distintos valores, partiendo de un mínimo de dos<sup>1</sup>. Los valores de los pesos de conexión entre la capa de entrada y la capa oculta pueden dar información de la importancia de los últimos valores de la serie secuencial, con valores bajos de los pesos indicando escasa importancia de los mismos.
- Retroalimentación de la salida: las redes dinámicas también pueden aprovechar los datos de salida anteriores para retroalimentar la entrada de la red. De esta forma, como datos de entrada se usarían la temperatura actual, temperaturas anteriores, y flujos de calor anteriores. Esta aproximación suele suponer resultados mejores con redes más sencillas<sup>2</sup>, al emplear todos los datos conocidos como entrada a la red, y siendo necesario por lo tanto que la red almacene menos información.

<sup>1</sup>En el análisis de los métodos de diferencias finitas se ha visto que con dos valores temporales de temperatura es suficiente para definir el flujo de calor. Aún así, cuantos más valores de entrada se empleen, más exacta será la red neuronal, y al mismo tiempo más sencilla será internamente

<sup>2</sup>Con menor número de neuronas totales

- Número de neuronas a emplear: el número de neuronas de la capa de entrada va a quedar definida por el número de elementos de entrada (número de variables y número de elementos de retraso temporal). De forma análoga, las neuronas de la capa de salida quedan definidas por el número de elementos de salida. Queda por determinar el número de neuronas en la capa oculta, que nuevamente tendrán que ser determinados mediante sucesivas pruebas.
- Funciones de transferencia de las neuronas: la práctica habitual es emplear una función sigmoide en la capa oculta, y la función lineal en la capa de salida. Estas funciones se pueden consultar en la tabla 2.3 de la página 65 y la figura 2.10 de la página 64. En esta ocasión, para la capa oculta se va a utilizar la función tangente sigmoide:

$$\text{tansig}(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \tag{8.2}$$

Se trata de una aproximación de la tangente hiperbólica, pero que cuenta con la ventaja de una mejor implementación en los programas de cálculo, manteniendo una derivación sencilla.

- Algoritmo de aprendizaje: El algoritmo de aprendizaje más utilizado para el perceptrón multicapa es el algoritmo Levenberg-Marquadt. Este algoritmo se basa en una variación del método de Newton para compaginar al mismo tiempo rapidez de convergencia, con una convergencia asegurada. Al algoritmo de Levenberg-Marquadt se le suele realizar una modificación adicional para mejorar la generalización de la red neuronal. Un exceso de neuronas en la red suele conllevar un menor error en las simulaciones, pero al mismo tiempo puede suponer una excesiva especialización de la misma en los datos que se han utilizado para entrenarla, y por lo tanto un peor ajuste con datos que se salgan de los de aprendizaje. En el capítulo 2 ya se comentó que uno de los métodos habituales es usar datos experimentales diferentes para el entrenamiento de la red y para su validación. En el presente estudio se ha aplicado este método, y se ha conjugado con lo que se conoce como Regularización Bayesiana, una modificación del algoritmo Levenberg-Marquadt por el que además de intentar minimizar el error de simulación, se minimiza también la suma de los valores de pesos y bias, y se intenta reducir no sólo su valor numérico, sino el número de valores a emplear en la red.

Con estas condiciones, y retomando la ecuación 8.1, la función  $f$  será la tangente hiperbólica para la capa oculta, y la función lineal para la capa de salida. La ecuación que relaciona las entradas a la red neuronal y las salidas será la siguiente:

$$q = \sum_{i=1}^N w_{2,i} \text{tansig} \left( \sum_{j=1}^R w_{1,j} T_j + b_j \right) + b \tag{8.3}$$

Se va a entrenar una red neuronal con tres capas (una capa oculta), mediante el algoritmo Levenberg-Marquadt, con regularización Bayesiana. Se han probado diferentes configuracio-



nes de elementos de retraso secuencial en la entrada y número de neuronas en la capa oculta, para determinar la configuración más adecuada al problema que se está estudiando. Se ha decidido también no emplear la retroalimentación, para comparar en igualdad de condiciones que el algoritmo en diferencias finitas, que empleaba sólo los datos de temperatura como datos de entrada.

Se ha aplicado inicialmente el método de las redes neuronales a los datos experimentales del ensayo en conductivímetro con Termiplast. En esta primera aproximación, se ha analizado de manera genérica la adecuación de este método para la simulación del comportamiento de las redes neuronales.

En una segunda fase, y teniendo en cuenta que la adecuación de las redes neuronales a la simulación de comportamientos complejos se mejora en la medida en la que se disponga de un gran número de datos del comportamiento real [182], se decidió diseñar un nuevo experimento en conductivímetro sobre un segundo material, el Energain de Dupont. Este segundo ensayo se ha diseñado con la idea de obtener una gran cantidad de datos, con el menor tiempo de ensayo posible.

El método de redes neuronales se quiere aplicar posteriormente al análisis del comportamiento de un muro compuesto de materiales convencionales y PCMs. Por eso, como primer paso, se va a analizar cómo se podrían conjuntar los métodos habituales de cálculo de la transferencia de calor a través de materiales convencionales, con el método de redes neuronales para los materiales de cambio de fase.

## 8.2. Análisis de muro compuesto

Como punto de partida, se va a suponer que el PCM se aplica en el interior, como última capa de un muro convencional. Tal y como se puede ver en la figura 8.4, en el exterior se sitúa un muro convencional, normalmente multicapa, y por el interior la capa de PCM. Además, a ambos lados hay aire en las condiciones ambientales tanto exteriores como interiores. En la figura 8.4 se representan además de las capas que conforman el muro, la temperaturas de mayor interés y los flujos de calor en cada intercara.

Tanto para el ambiente exterior como para el interior, el flujo de calor en el contacto entre la superficie del muro y el aire se produce por convección, siguiendo la ley de enfriamiento de Newton:

$$q_{conv} = h_{conv} \cdot (T_i - T_{\infty}) \quad (8.4)$$

La base del cálculo de transferencia de calor en muros convencionales se basa en los métodos de transformadas integrales para el régimen dinámico analizados en el apartado 2.6.2.1. Normalmente este cálculo se realiza utilizando el método de funciones de transferencia de la conducción o CTF, tal y como se comentó con anterioridad. Se basa en una serie de parámetros que se relacionan mediante ecuaciones lineales con la serie temporal de temperaturas y flujos de calor en ambas caras, para dar lugar a las ecuaciones 8.5 y 8.6.

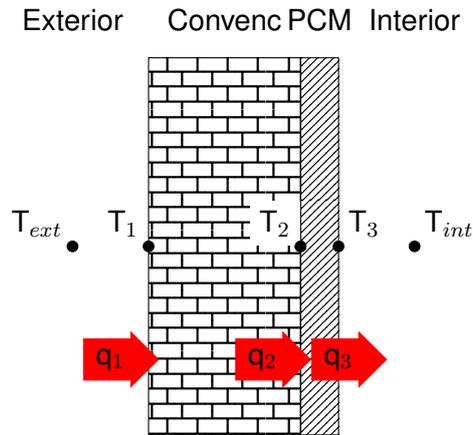


Figura 8.4: Esquema de un muro compuesto, con representación de la temperaturas de mayor interés, y los flujos de calor de cada intercara

$$q_{ext,n} = \sum_{k=0}^{n_a} a_k \cdot T_{ext,n-k} - \sum_{k=0}^{n_b} b_k \cdot T_{int,n-k} - \sum_{k=1}^{n_d} d_k \cdot q_{ext,n-k} \quad (8.5)$$

$$q_{int,n} = \sum_{k=0}^{n_b} b_k \cdot T_{ext,n-k} - \sum_{k=0}^{n_c} c_k \cdot T_{int,n-k} - \sum_{k=1}^{n_d} d_k \cdot q_{int,n-k} \quad (8.6)$$

Al mismo tiempo, para la simulación de la capa con PCM, se plantea entrenar una red neuronal, usando para ello datos obtenidos experimentalmente, siendo la ecuación para el cálculo del flujo de calor la siguiente:

$$q = \sum_{i=1}^N w_{2,i} \text{tansig} \left( \sum_{j=1}^R w_{1,j} T_j + b_j \right) + b \quad (8.7)$$

Siendo  $T_j$  el vector de temperaturas a ambos lados de la capa de PCM en el instante actual y anteriores, empezando por la temperatura de la cara en la que se quiere calcular el flujo de calor, y la función de transferencia la tangente sigmoide en este caso, que sigue la siguiente ecuación:

$$\text{tansig}(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (8.8)$$

Aplicando estas ecuaciones a cada una de las capas y flujos de calor de la figura 8.4, se



obtiene el siguiente sistema de ecuaciones<sup>3</sup>:

$$q_{1,n} = h_{ext} (T_{ext,n} - T_{1,n}) \quad (8.9a)$$

$$q_{1,n} = \sum_{k=0}^{n_a} a_k \cdot T_{1,n-k} - \sum_{k=0}^{n_b} b_k \cdot T_{2,n-k} - \sum_{k=1}^{n_d} d_k \cdot q_{1,n-k} \quad (8.9b)$$

$$q_{2,n} = \sum_{k=0}^{n_b} b_k \cdot T_{1,n-k} - \sum_{k=0}^{n_c} c_k \cdot T_{2,n-k} - \sum_{k=1}^{n_d} d_k \cdot q_{2,n-k} \quad (8.9c)$$

$$q_{2,n} = \sum_{i=1}^N w_{2,i} \text{tansig} \left( \sum_{j=1}^R w_{1,j} T_2^3 + b_j \right) + b \quad (8.9d)$$

$$q_{3,n} = - \sum_{i=1}^N w_{2,i} \text{tansig} \left( \sum_{j=1}^R w_{1,j} T_3^2 + b_j \right) - b \quad (8.9e)$$

$$q_{3,n} = h_{int} (T_{3,n} - T_{int,n}) \quad (8.9f)$$

Como se puede observar, se obtiene un sistema de 6 ecuaciones no lineales, y 6 incógnitas, que son los tres flujos de calor y las 3 temperaturas intercara. La temperatura exterior e interior son las condiciones de contorno cuya variación irá provocando que el resto de variables evolucionen.

La mayoría de métodos de resolución de sistemas de ecuaciones se basan en resolver un sistema de ecuaciones de la forma  $\mathbf{F}(\mathbf{x})=\mathbf{0}$ , con lo que es necesario reordenar las ecuaciones de la siguiente forma:

$$h_{ext} (T_{ext,n} - T_{1,n}) - q_{1,n} = 0 \quad (8.10a)$$

$$\sum_{k=0}^{n_a} a_k \cdot T_{1,n-k} - \sum_{k=0}^{n_b} b_k \cdot T_{2,n-k} - \sum_{k=1}^{n_d} d_k \cdot q_{1,n-k} - q_{1,n} = 0 \quad (8.10b)$$

$$\sum_{k=0}^{n_b} b_k \cdot T_{1,n-k} - \sum_{k=0}^{n_c} c_k \cdot T_{2,n-k} - \sum_{k=1}^{n_d} d_k \cdot q_{2,n-k} - q_{2,n} = 0 \quad (8.10c)$$

$$\sum_{i=1}^N w_{2,i} \text{tansig} \left( \sum_{j=1}^R w_{1,j} T_2^3 + b_j \right) + b - q_{2,n} = 0 \quad (8.10d)$$

$$- \sum_{i=1}^N w_{2,i} \text{tansig} \left( \sum_{j=1}^R w_{1,j} T_3^2 + b_j \right) - b - q_{3,n} = 0 \quad (8.10e)$$

$$h_{int} (T_{3,n} - T_{int,n}) - q_{3,n} = 0 \quad (8.10f)$$

<sup>3</sup>Los subíndices y superíndices de la temperatura de las ecuaciones 8.9b y 8.9c hacen referencia al orden en el que se sitúan las temperaturas de cada cara

### 8.3. Aplicación al ensayo de Termiplast

Inicialmente, se plantea emplear los datos obtenidos del ensayo con el Termiplast para estudiar la adecuación de las redes neuronales al tratamiento del comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase. Como se acaba de describir, interesa obtener la relación entre los flujos de calor en las dos caras superficiales del PCM, y la evolución de las temperaturas en ambas caras. Por ese motivo, no es necesario analizar la evolución de las temperaturas en el interior del material, tal y como se ha hecho en el análisis del método de diferencias finitas.

Se describe a continuación el proceso de entrenamiento de la red neuronal para el Termiplast, y los resultados obtenidos. Parte de este análisis ya ha sido publicado por el autor previamente [200].

#### 8.3.1. Resultados del entrenamiento de la red neuronal

Se han entrenado distintas redes neuronales considerando las siguientes variables:

- Distinto número de elementos de retraso temporal, entre 2 y 4 elementos por cada una de las temperaturas de entrada
- Distinto número de neuronas en la capa oculta, variando de 20 a 40 neuronas

Los resultados obtenidos demuestran las reglas habituales de las redes neuronales. Las redes más complejas, con mayor número de elementos, obtienen mejor ajuste de los datos de salida.

Hay que destacar que para todos los casos el ajuste de las redes neuronales es superior al obtenido con el método de diferencias finitas. Como ejemplo, la red neuronal más sencilla entrenada, con una configuración 4-20-2<sup>4</sup>. Esta red presenta un error absoluto medio de  $\pm 0.52$  W/m<sup>2</sup> <sup>5</sup>, y un error máximo de  $\pm 4.57$  W/m<sup>2</sup>. Este error máximo es inferior al error medio obtenido con el algoritmo en diferencias finitas, que era  $\pm 5.7$  W/m<sup>2</sup>. Como se puede observar, el comportamiento de la red neuronal es notablemente superior al del método en diferencias finitas propuesto.

En la figura 8.5 se han representado los flujos de calor obtenidos por simulación de esta red neuronal, junto con los medidos de forma experimental. El ajuste es tan estrecho, que resulta difícil distinguir los resultados de la simulación de los datos experimentales<sup>6</sup>.

La red neuronal que mejor comportamiento ha demostrado está formada por 4 elementos de retraso temporal por cada una de las temperaturas superficiales, y 40 neuronas en la capa oculta, por lo tanto una red 8-40-2. Esta red cuenta con un error absoluto medio de  $\pm 0.22$

<sup>4</sup>Las redes neuronales se suelen identificar por el número de neuronas de cada capa, con lo que una red 4-20-2 consta de un único elemento de retraso de los cada uno de los dos datos de entrada, 20 neuronas en la capa oculta, y los dos datos de salida de flujos de calor

<sup>5</sup>Este error absoluto se corresponde con un 0.3% de la variación total del flujo de calor durante el ensayo

<sup>6</sup>Se han representado los datos experimentales con una línea negra más fina, para poder observar mejor las pequeñas oscilaciones de los datos de la simulación

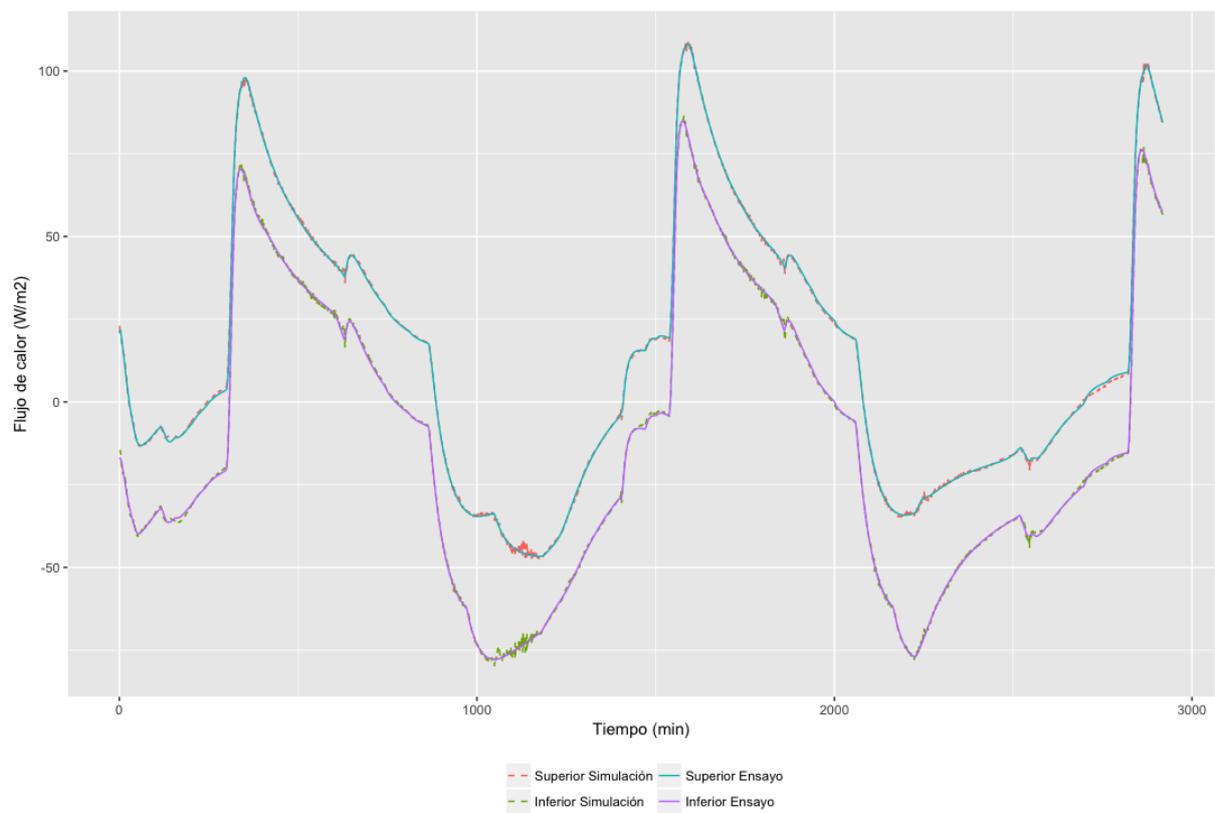


Figura 8.5: Resultado de las simulaciones de la red neuronal 4-20-2

$W/m^{27}$ , y un error máximo de  $\pm 2.75 W/m^2$ . Este error medio obtenido se encuentra en el mismo rango de incertidumbre que la medición de flujo, que era de  $\pm 0.1 W/m^2$ .

En la figura 8.6 se han representado los resultados de las simulaciones con esta red. Una vez más, el estrecho ajuste obtenido dificulta distinguir los resultados de la simulación de los experimentales.

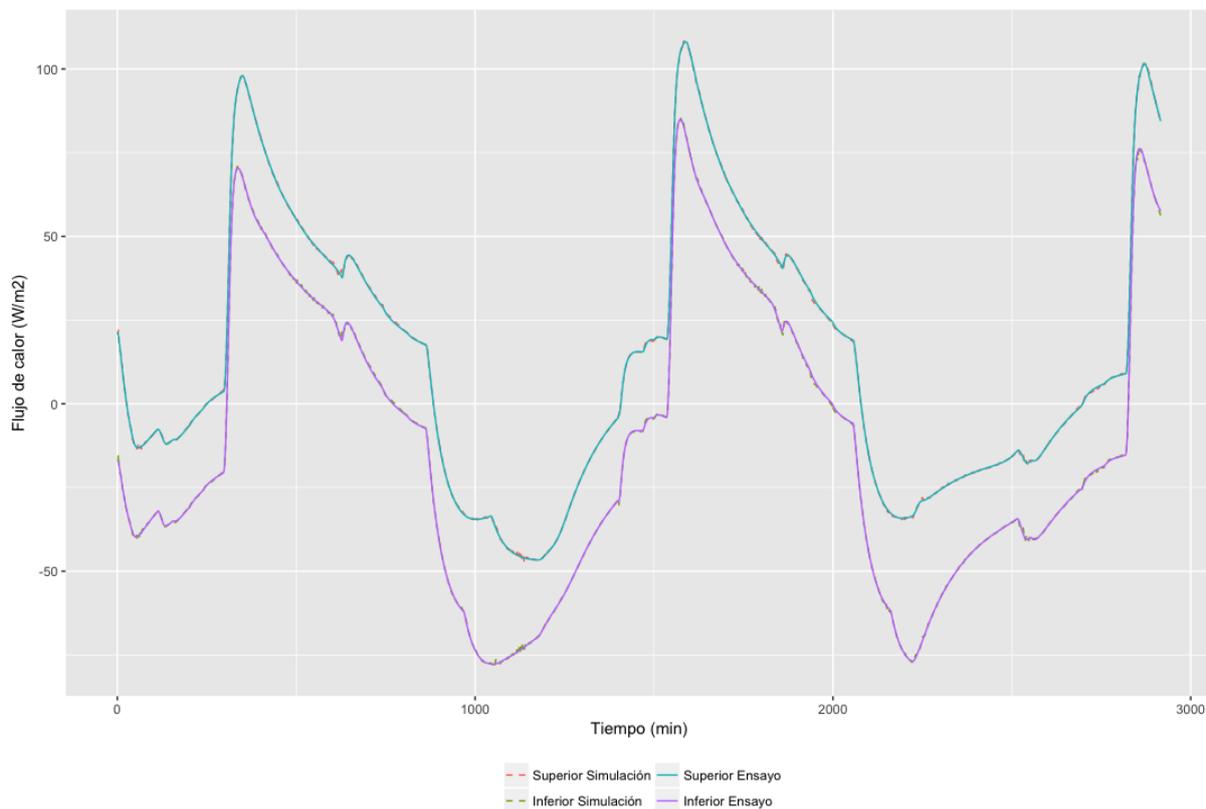


Figura 8.6: Resultado de las simulaciones de la red neuronal 8-40-2

### 8.3.2. Análisis de sensibilidad y propagación de errores

Para finalizar el análisis del funcionamiento de las redes neuronales para la evaluación del comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase, se va a analizar la sensibilidad que presentan las redes neuronales a las incertidumbres de medición, y cómo se propagan los errores de las lecturas. En el caso actual los únicos elementos de entrada a la red neuronal son las temperaturas superficiales, que se han medido con un grado de incertidumbre de  $\pm 0.2 ^\circ C$ .

Para realizar este análisis, se han tomado los valores de temperaturas superficiales y se han alterado sus valores dentro del rango de incertidumbre. Con esos datos modificados, se han recalculado los flujos de calor superficiales. En la figura 8.7 se han representado los valores del flujo de calor obtenidos de los datos de temperatura medidos (líneas sólidas), y los

<sup>7</sup>Este error absoluto se corresponde con un 0.12% de la variación total del flujo de calor durante el ensayo

valores máximos y mínimos obtenidos con los valores de temperatura modificados dentro del rango de incertidumbre.

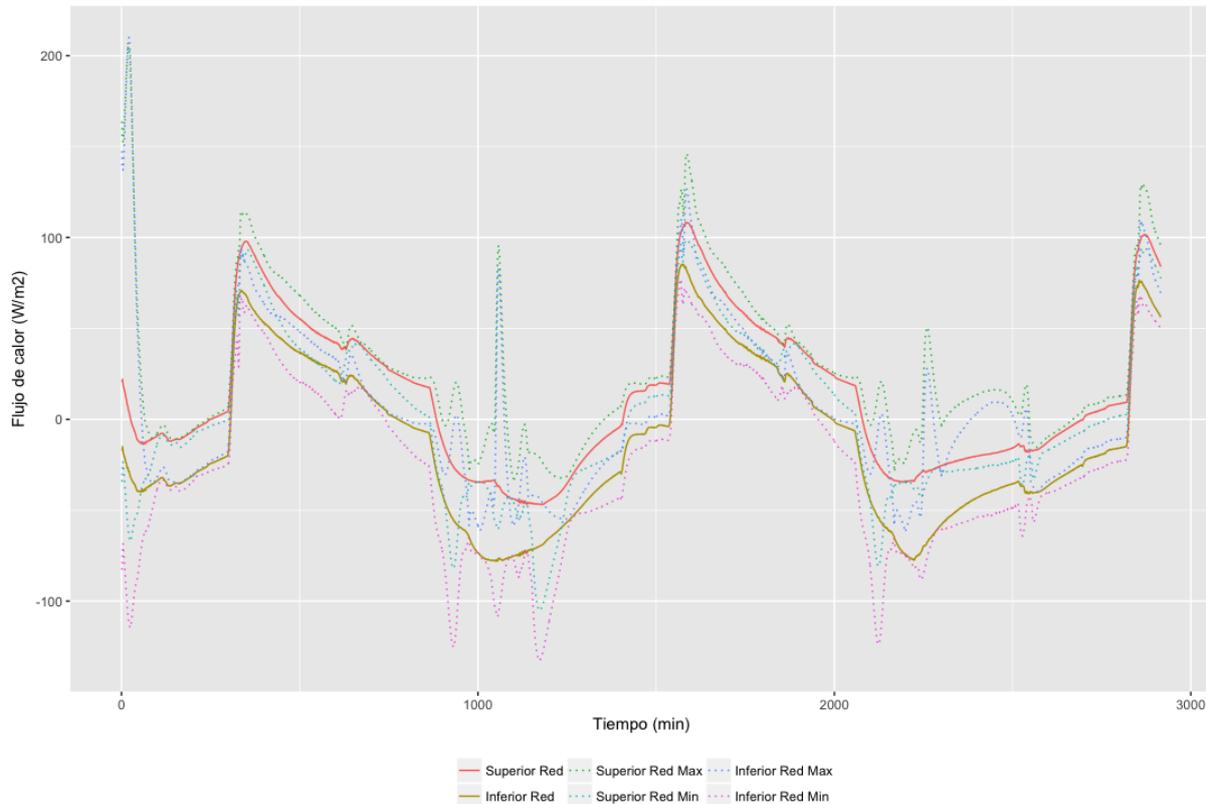


Figura 8.7: Análisis de sensibilidad de la red neuronal 8-40-2

Como se puede observar, a pesar de que la red neuronal elegida presenta un buen comportamiento con los datos nominales, obtiene desviaciones importantes al hacer variar los datos de entrada dentro del límite de incertidumbre de las mediciones. Aún así este problema es fácilmente subsanable. Las redes neuronales presentan un buen comportamiento ante el error de mediciones, siempre que se incluya en los datos de entrenamiento. Para ello se ha vuelto a entrenar la red neuronal, pero además de los datos experimentales nominales, se han incluido también los datos de temperaturas y flujos dentro de los límites de incertidumbre de los sensores.

Esta segunda aproximación, en la que se incluye la incertidumbre de medición de los sensores, presenta un comportamiento ligeramente peor que al usar sólo los datos nominales, debido a la mayor dispersión de los datos de entrada. En este caso el error absoluto medio es de  $\pm 0.45 \text{ W/m}^2$ , y un error absoluto máximo de  $\pm 5.59 \text{ W/m}^2$ . Aún así, y a pesar del aumento de los errores, el comportamiento de esta red neuronal sigue siendo notablemente superior al del algoritmo en diferencias finitas.

La sensibilidad de la red a la incertidumbre en los valores de medición mejora de manera visible, tal y como se muestra en la figura 8.8.

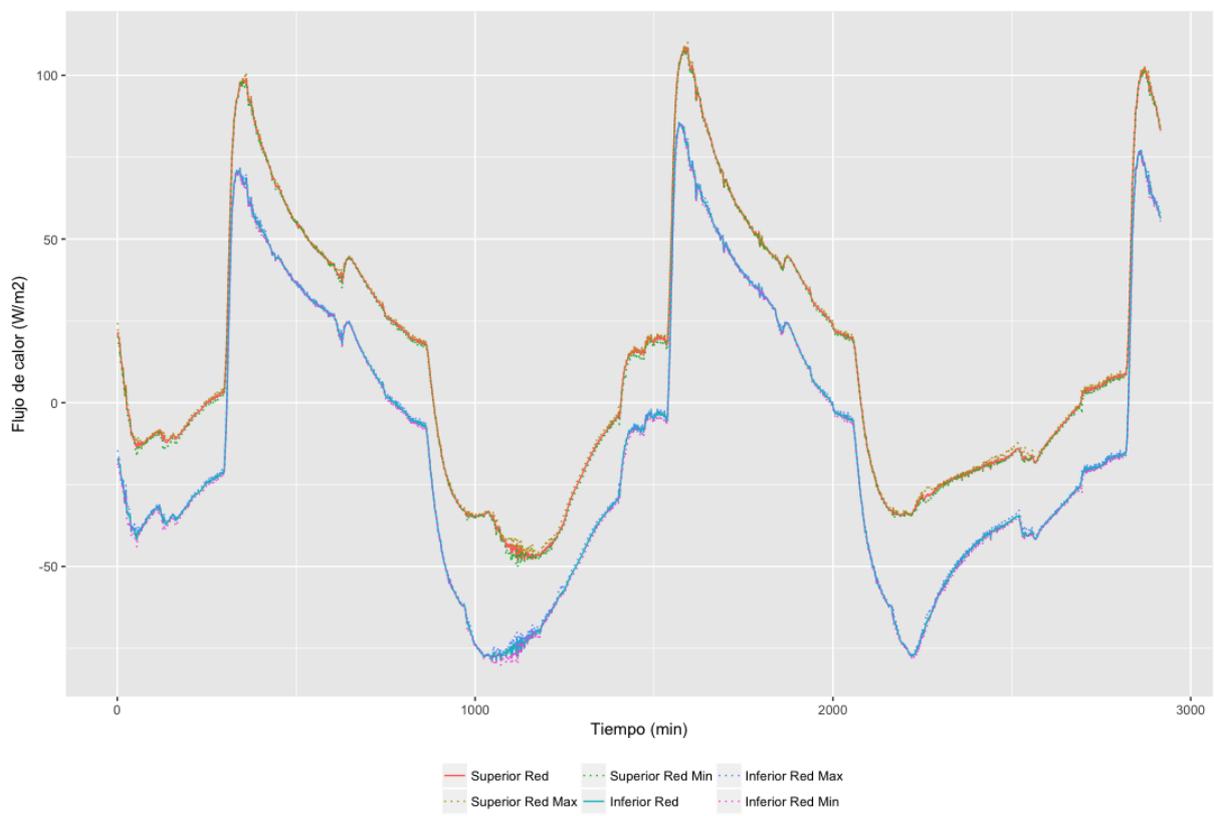


Figura 8.8: Análisis de sensibilidad de la red neuronal 8-40-2 modificada



### 8.3.3. Conclusiones

Se han utilizado las redes neuronales para calcular el comportamiento de los materiales de cambio de fase, ante temperaturas superficiales variables. Para entrenar la red, se han empleado los datos experimentales procedentes de un ensayo en conductivímetro. Los errores obtenidos se han mantenido en todo momento en valores muy bajos, similares al rango de incertidumbre de los fluxímetros. El error absoluto medio obtenido es de  $\pm 0.45 \text{ W/m}^2$ , mientras que la incertidumbre de la medición de flujo es de  $\pm 0.1 \text{ W/m}^2$ . Se ha determinado también un método para reducir la propagación de errores en la red neuronal, usando datos de entrada modificados dentro de los rangos de incertidumbre.

El método de cálculo mediante redes neuronales presenta una gran velocidad de resolución. Los cálculos se resuelven prácticamente en tiempo real, puesto que se trata de una única operación matricial en cada intervalo de tiempo, muy adecuada además para el cálculo en paralelo de los procesadores de varios núcleos habituales hoy en día. Como ejemplo, la simulación del ensayo del conductivímetro tarda en torno a un segundo, con lo que extrapolando este tiempo de cálculo para los datos de un año completo, tardaría unos 3 minutos en realizar la simulación completa.

Una ventaja adicional de la red neuronal es la gran versatilidad que presenta. No tiene problemas de estabilidad, con lo que se puede usar cualquier intervalo temporal y anchura de la muestra, siempre que el intervalo de tiempo seleccionado sea adecuado a la velocidad de variación de las temperaturas superficiales. Además, al no precisar de ninguna asunción previa sobre la configuración interna de la muestra, se puede aplicar a materiales que presenten una gran heterogeneidad, o con convección en la fase líquida.

## 8.4. Ensayo de Energain en conductivímetro

Como se acaba de demostrar, el método de las redes neuronales parece adecuado para la simulación del comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase. De todos modos, la clave para un correcto entrenamiento de una red neuronal es disponer de datos experimentales que se asemejen lo más posible al comportamiento que posteriormente se quiere simular mediante la red. Cuanto más parecidos sean los datos de entrenamiento de las situaciones que posteriormente se quieren simular, mejor ajuste se obtendrá en las simulaciones [182]. Esto implica que la fase de preparación de ensayos para obtener los datos experimentales, tiene una importancia vital en el resultado final.

Por este motivo, se ha diseñado un ensayo en varias fases, para obtener datos experimentales a distintas velocidades de calentamiento y enfriamiento, dentro de los rangos de temperatura habituales en el uso de estos materiales. El objetivo es obtener la mayor cantidad de datos posibles de un ensayo sencillo. Por ese motivo se ha diseñado un ensayo en conductivímetro en dos fases, con diferentes velocidades de enfriamiento y calentamiento, tal y como se ha explicado en el apartado 6.2.

A continuación se explicará el tratamiento de datos que se ha seguido para entrenar una red neuronal con estos datos, y los resultados de la misma.

### 8.4.1. Preparación para el entrenamiento de la red neuronal

Para poder analizar adecuadamente el problema, hay que tener también en cuenta el uso posterior que se va a hacer de la red obtenida. En el ensayo del conductivímetro, se han recogido los datos de temperatura y flujo de calor cada minuto. Sin embargo, muchos programas de cálculo del comportamiento de edificios trabajan usando como base temporal la hora, y definiendo en todo caso divisiones de la hora. Por ello, se ha optado por entrenar la red empleando intervalos de tiempo de 6 minutos, que equivalen a 0.1 horas, de manera que el divisor es exacto<sup>8</sup>. Esta propuesta, permite reorganizar los datos recogidos, dividiendo las secuencias recogidas cada minuto, en 6 secuencias separadas cada 6 minutos, siguiendo el esquema de la figura 8.9. De esta forma, se consigue obtener el equivalente a 6 ensayos distintos para cada uno de los ensayos realizados.

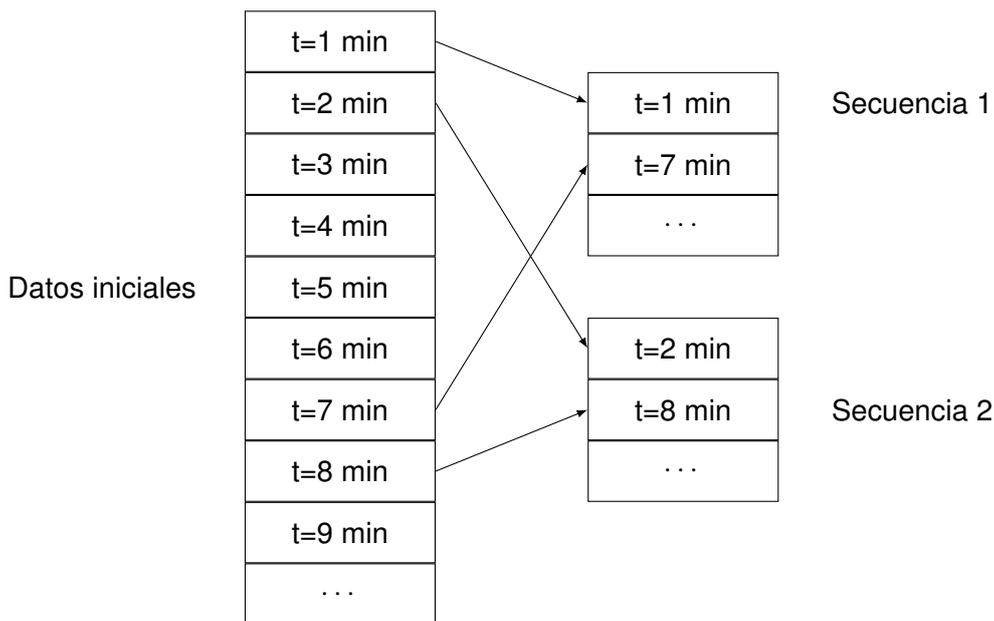


Figura 8.9: Reordenación de los datos experimentales

Además, y tal y como se ha comentado con anterioridad, se desea aplicar este método imitando en cuanto a datos de entrada y salida las ecuaciones del método CTF (ecuaciones 8.11 y 8.12), en la medida de lo posible.

$$q_{0,n} = \sum_{k=0}^{n_a} a_k \cdot T_{0,n-k} - \sum_{k=0}^{n_b} b_k \cdot T_{L,n-k} - \sum_{k=1}^{n_d} d_k \cdot q_{0,n-k} \quad (8.11)$$

$$q_{L,n} = \sum_{k=0}^{n_b} b_k \cdot T_{0,n-k} - \sum_{k=0}^{n_c} c_k \cdot T_{L,n-k} - \sum_{k=1}^{n_d} d_k \cdot q_{L,n-k} \quad (8.12)$$

<sup>8</sup>Si empleáramos un minuto, el divisor sería  $1/60 = 0.016667$  que no es un divisor exacto



Finalmente, resulta útil reflejar la condición de simetría de la red neuronal. Se entrena una única red neuronal, usando todos los datos de variaciones de temperatura y flujos de calor en una sola cara, de la siguiente manera. Usando la nomenclatura de las ecuaciones 8.11 y 8.12:

- Asignamos inicialmente al lado caliente del conductímetro el subíndice 0, y al lado frío el subíndice L.
- Retomamos todos los datos, pero les cambiamos los índices, asignando ahora el subíndice 0 al lado frío, y el subíndice L al lado caliente. En este caso, es necesario cambiar el signo de los flujos de calor, porque se han asignado en el ensayo usando criterios distintos:
  - Para el ensayo, el flujo de calor positivo es el que va del lado caliente al lado frío
  - Para las ecuaciones 8.11 y 8.12, el flujo de calor positivo es el entrante, del lado 0 al lado L

Con esta configuración, si obtenemos la red neuronal que calcula el flujo de calor de uno de los lados,

$$q_0 = f(T_0, T_L, q_0) \quad (8.13)$$

la red para calcular el flujo de la otra cara será:

$$q_L = -f(T_L, T_0, -q_L) \quad (8.14)$$

igual que sucede con las ecuaciones 8.11 y 8.12 para los muros simétricos. Conseguimos de esta forma duplicar los datos de los ensayos, obteniendo así una mayor cantidad de datos y condiciones de ensayo, para un mejor ajuste en el entrenamiento de la red.

Una vez reordenados todos los datos, disponemos de más de 24,000 datos de ensayo, que equivalen a 100 días de ensayo.

#### 8.4.2. Red neuronal con retroalimentación: red NARX

Como se ha visto en las ecuaciones 8.11 y 8.12, el método de CTFs emplea los valores de temperatura de cada instante y de los instantes anteriores, y además se retroalimenta de los valores anteriores de los flujos de calor. Esta estructura se puede replicar mediante una red neuronal dinámica retroalimentada, también conocida como red NARX<sup>9</sup>. Como una primera propuesta, se va a emplear este tipo de arquitectura de red neuronal, que se representa en la figura 8.10.

El resto de características que se han propuesto para esta red son las siguientes:

- Capa de entrada: La capa de entrada va a estar compuesta por dos grupos de neuronas, cada uno de los cuales va a recibir los valores de temperaturas de cada una de las

<sup>9</sup>Nonlinear AutorRegressive eXogenous. El término AutoRegressive hace referencia a la retroalimentación de los resultados previos de la red, el flujo de calor en este caso, mientras que el término eXogenous se refiere al hecho de que también usa valores externos, en este caso la temperatura.

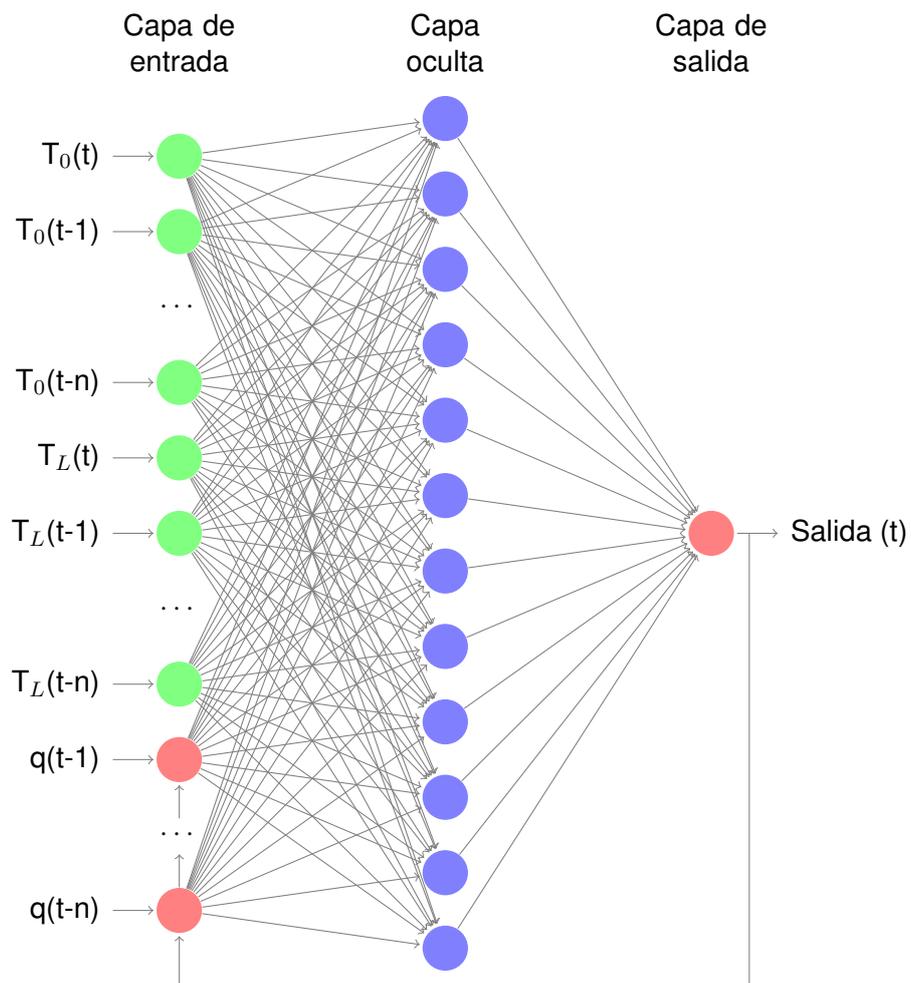


Figura 8.10: Esquema de red neuronal NARX



caras. Cada uno de estos grupos está formado a su vez por un número determinado de neuronas, cada una de las cuales toma el valor actual o los previos de la temperatura que le corresponda.

- **Capa oculta:** se va a elegir una capa oculta únicamente, y se va a variar el número de neuronas de esta capa para optimizar el funcionamiento de la red neuronal. Como función de activación se va a emplear la tangente hiperbólica.
- **Capa de salida:** se va a emplear una capa de salida con una única neurona y función de activación lineal. La salida de esta neurona será el flujo de calor de una de las caras, y al mismo tiempo, se retroalimentará para los cálculos siguientes de la red. Por este motivo, se deberían usar dos redes, cada una para cada flujo de calor, para replicar el modelo de los CTFs, en el que cada flujo de calor se calcula por separado usando únicamente los valores de flujo anteriores del mismo lado del muro, aunque la condición de simetría de la muestra ensayada va a permitir usar una única red como se explica a continuación.
- **Simetría:** el ensayo se ha realizado sobre una muestra que es perfectamente simétrica, con lo que la red debería ser capaz de dar una respuesta simétrica. Esto implica que ante las mismas variaciones de calor en lados distintos, los flujos de calor en la superficie tienen que ser iguales. Por lo tanto, la misma red va a servir para obtener los flujos de calor de ambos lados, sin más que cambiar el orden de introducción de los datos de temperatura.

Con todos los datos organizados según se explica en el apartado anterior, se ha procedido a entrenar una red tipo NARX, que aplicando la condición de simetría, permitirá calcular el flujo de calor a cada lado. Como ya se ha comentado con anterioridad, se ha ido variando el número de neuronas de la capa oculta, así como el número de datos de entrada que se emplean tanto para las temperaturas, como para la retroalimentación del flujo de calor.

Los resultados obtenidos de este tipo de red muestran un comportamiento errático, que aumenta a lo largo del tiempo. Como se preveía ese comportamiento, se ha entrenado la red con porciones de los ensayos. Se ha troceado cada uno de los ensayos en partes iguales de 14.5 horas, con los que se ha alimentado la red durante el entrenamiento. Al simular con posterioridad uno de los ensayos completo, se encuentra de nuevo el comportamiento errático en la respuesta, tal y como se muestra en la figura 8.11. Los pequeños errores en los resultados de la simulación parece que se ven amplificados a lo largo del tiempo.

Ampliando el gráfico para el inicio de la simulación, se comprueba el buen ajuste inicial, y cómo se van ampliando los errores a lo largo del tiempo (figura 8.12).

Por este motivo, se abandona la propuesta de usar redes con retroalimentación tipo NARX, y se pasa a analizar la opción de usar redes dinámicas convencionales, sin retroalimentación, igual a las utilizadas para el ensayo con Termiplast.

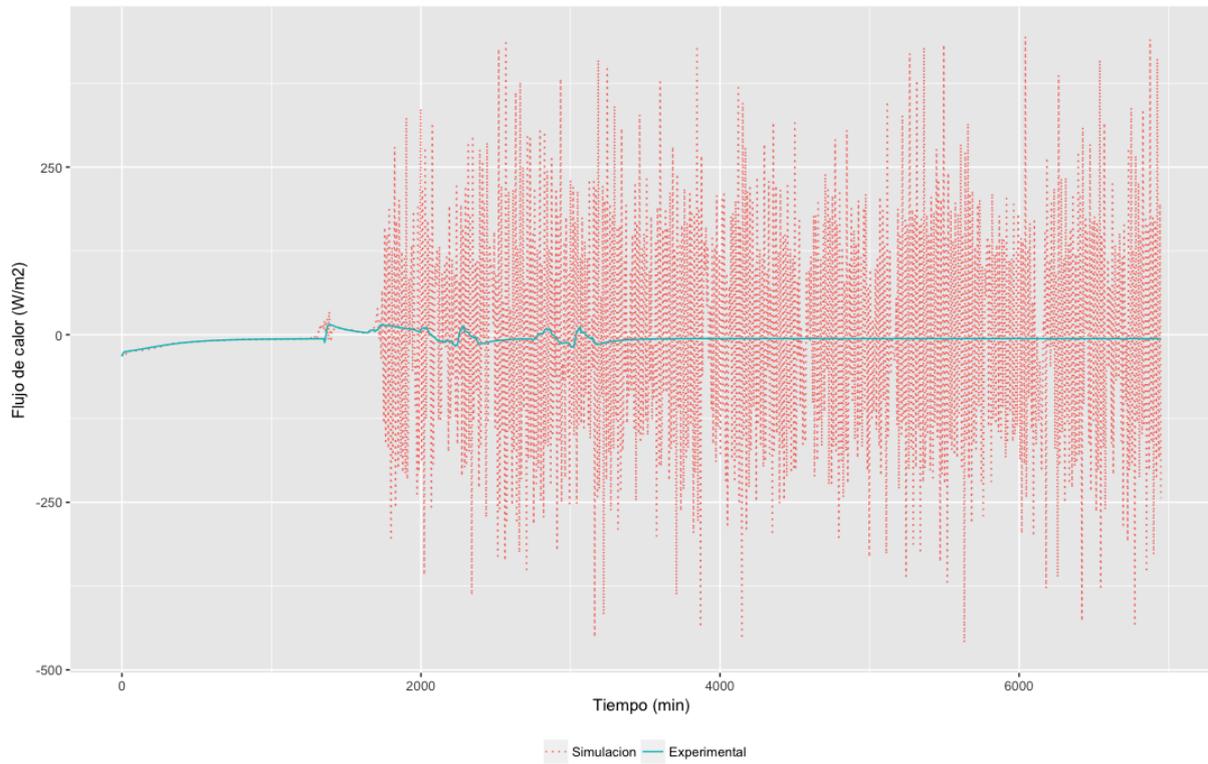


Figura 8.11: Resultado de la simulación de la red NARX

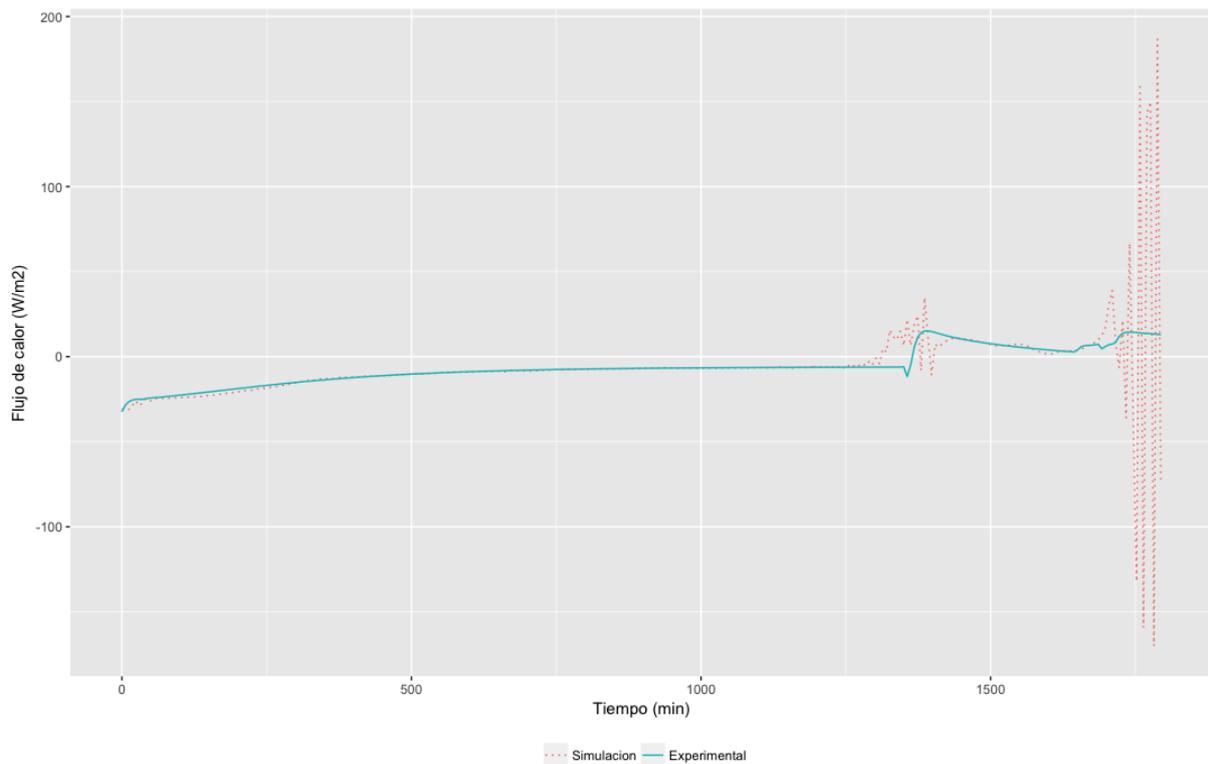


Figura 8.12: Ampliación del resultado de la simulación de la red NARX

### 8.4.3. Red neuronal dinámica sin retroalimentación

En vista de los resultados del entrenamiento de las redes tipo NARX con retroalimentación, se decide emplear una red dinámica convencional, sin retroalimentación, igual que la utilizada en el apartado anterior 8.3. Al no retroalimentarse con los datos de salida de la red, no debería presentar el comportamiento oscilatorio generado por la propagación de errores. Este tipo de red está representada en la Figura 8.13.

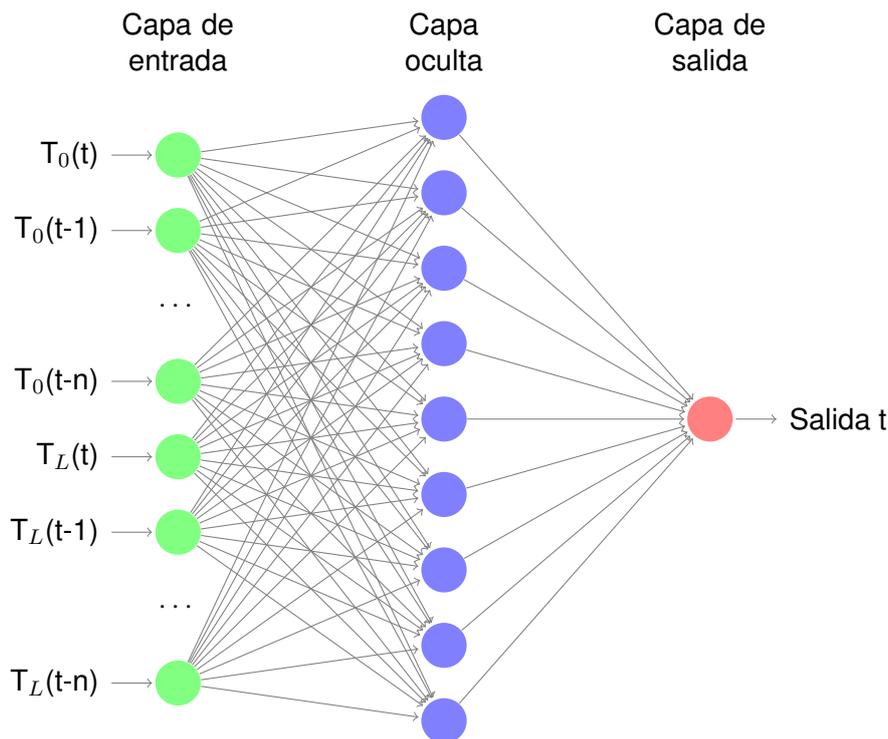


Figura 8.13: Esquema de red neuronal dinámica sin retroalimentación

Con respecto a la configuración de las capas y neuronas de la red, se va a usar una configuración similar a la red NARX anterior:

- Capa de entrada: La capa de entrada va a estar compuesta por dos grupos de neuronas, cada uno de los cuales va a recibir los valores de temperaturas de cada una de las caras. Cada uno de estos grupos está formado a su vez por un número determinado de neuronas, que van a tomar el valor actual o los previos de la temperatura que les corresponda.
- Capa oculta: se va a elegir una capa oculta únicamente, y se va a variar el número de neuronas de esta capa para optimizar el funcionamiento de la red neuronal. Como función de activación se va a emplear la tangente hiperbólica.
- Capa de salida: se va a emplear una capa de salida con una única neurona y función de activación lineal. La salida de esta neurona será el flujo de calor de una de las caras.

- Simetría: el ensayo se ha realizado sobre una muestra que es perfectamente simétrica, con lo que la red es capaz de dar una respuesta simétrica. Esto implica que ante las mismas variaciones de calor en lados distintos, los flujos de calor en la superficie tienen que ser iguales. Por lo tanto, la misma red va a servir para obtener los flujos de calor de ambos lados, sin más que cambiar el orden de introducción de los datos de temperatura.

Mención especial merece la definición del número de neuronas de la capa de entrada. El número de datos de entrada con los que hay que alimentar la red, está ligado con la velocidad de respuesta que tiene el material ante los cambios de temperatura de su entorno, esto es, con la inercia del material. El fabricante del material no da información al respecto, pero analizando el tiempo de estabilización que presenta el material en los ensayos realizados, se estima que la estabilización del mismo ronda los 200 minutos. Por este motivo, y teniendo en cuenta que el tiempo entre muestras que se utiliza en esta red es de 6 minutos, se ha decidido utilizar 35 datos de entrada para la red dinámica<sup>10</sup>. Como se verá con posterioridad, este dato es importante a la hora de analizar el comportamiento de la red ante condiciones diferentes a las del ensayo.

#### 8.4.3.1. Resultados iniciales del entrenamiento

Con estas condiciones, se ha procedido a ensayar la red dinámica. Se ha utilizado para ello el método de Regularización Bayesiana que ya se ha mencionado en la introducción de este capítulo, para mejorar la generalización de la misma. Además, el criterio de parada del entrenamiento que se ha utilizado tiene como referencia el error promedio de medida de los flujos de calor. El error de medición de los fluxímetros es de  $\pm 5\%$  de la magnitud medida, y el valor medio del flujo de calor es de  $8.53 \text{ W/m}^2$ . Esto supone un error medio en la medición de  $0.43 \text{ W/m}^2$ , y un error cuadrático medio de  $0.182$ <sup>11</sup>.

Con estos datos, se ha comprobado que la red  $2 \times 35 - 40 - 1$ <sup>12</sup> presenta un buen comportamiento, y un valor de MSE<sup>13</sup> de  $0.1127$ , inferior al error de medida de los fluxímetros.

En las figuras 8.14, 8.15 y 8.16<sup>14</sup> se representa el resultado de utilizar la red entrenada para simular los ensayos realizados sobre el Energain. Como se puede observar, el ajuste es bueno, siguiendo con bastante fidelidad la evolución de los flujos de calor. Se puede concluir por lo tanto que la red obtenida es adecuada para simular la evolución de una doble capa de Energain en un muro. De todos modos, se quiere avanzar más en el análisis de la respuesta

<sup>10</sup>35 datos equivalen a 210 minutos, con lo que aumentamos el tiempo de estabilización, y obtenemos un mayor margen de seguridad

<sup>11</sup>El algoritmo de Regularización Bayesiana usa como criterio de análisis del ajuste de la red el error cuadrático medio o MSE

<sup>12</sup>Se trata de una red con dos valores de entrada con 35 intervalos cada uno, 40 neuronas en la capa oculta, y una neurona en la capa de salida

<sup>13</sup>Mean Squared Error o Error Cuadrático Medio

<sup>14</sup>Si se compara esta figura 8.16 con el resultado del ensayo en la figura 6.7, se puede observar que difieren de manera notable. Esto es debido a que en la simulación no aparecen los 35 datos iniciales, debido a que se utilizan para rellenar inicialmente la capa de neuronas de entrada

de esta red ante situaciones distintas, e incluso analizar la sensibilidad de la misma ante los errores en los datos de entrada, como ya se realizó en el apartado 8.3.

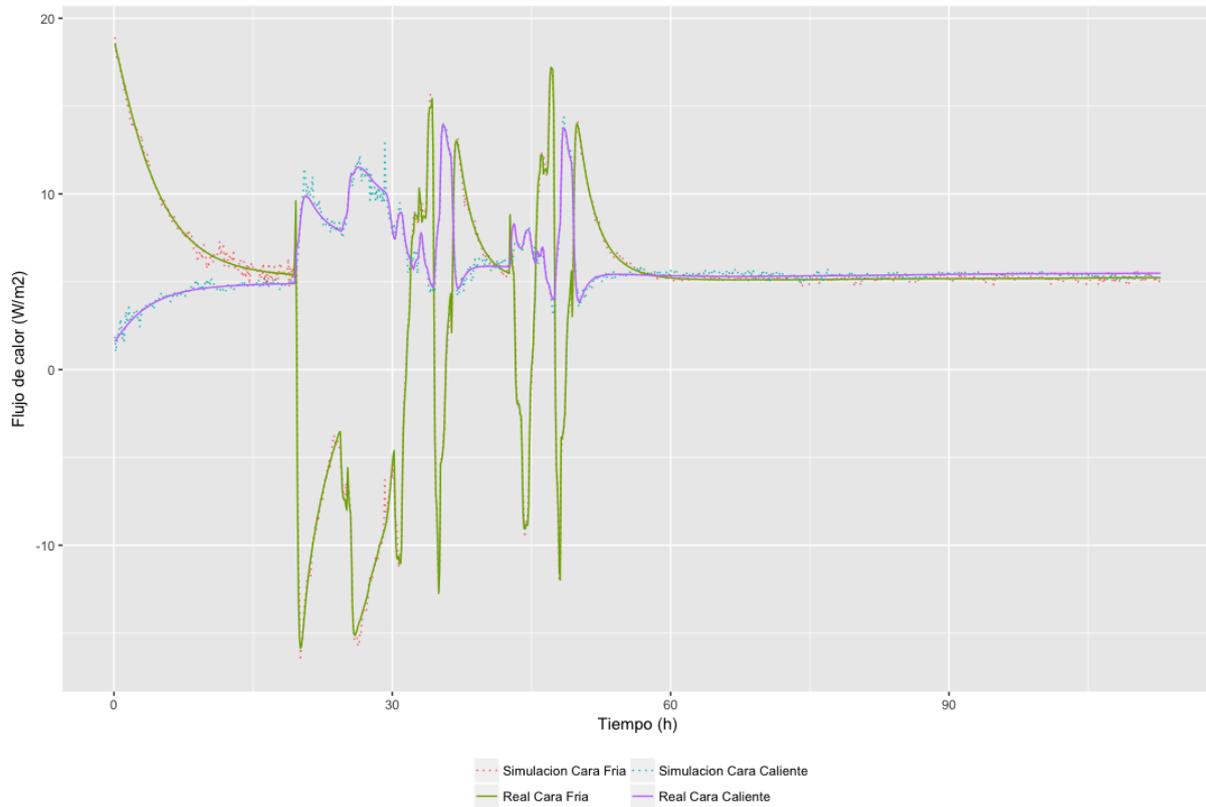


Figura 8.14: Resultados de la simulación del ensayo 1

**8.4.3.1.1. Respuesta ante temperaturas constantes e iguales a ambos lados** En estado estacionario, cuando se fijan las mismas temperaturas a ambos lados de un material, el flujo de calor debe ser nulo. Para ello, el material debe estar a la misma temperatura que las dos caras, o pasará previamente por un estado transitorio hasta que se igualen las temperaturas y el flujo de calor se anule.

En el caso de la red neuronal, la manera de informar a la red de que se encuentra en estado estacionario, es rellenar la capa de entrada de valores de temperatura iguales en ambos lados en las 35 neuronas de entrada que se han definido. Al mismo tiempo, se añade la información de que durante esos 35 instantes anteriores el flujo de calor ha sido nulo. De esta forma, la red sabe que la situación se ha mantenido estacionaria en los instantes anteriores<sup>15</sup>, y debería de dar como respuesta un flujo de calor nulo para instantes posteriores.

Al hacer esta prueba para distintas temperaturas, se comprueba que la red devuelve valores no nulos. Esto significa que los datos experimentales con los que se ha entrenado la red no han sido suficientes para que la red aprenda la respuesta a un estado estacionario con igual

<sup>15</sup>Esos 35 instantes corresponden a tres horas y media, lo suficiente para asegurar que se ha descargado completamente la placa

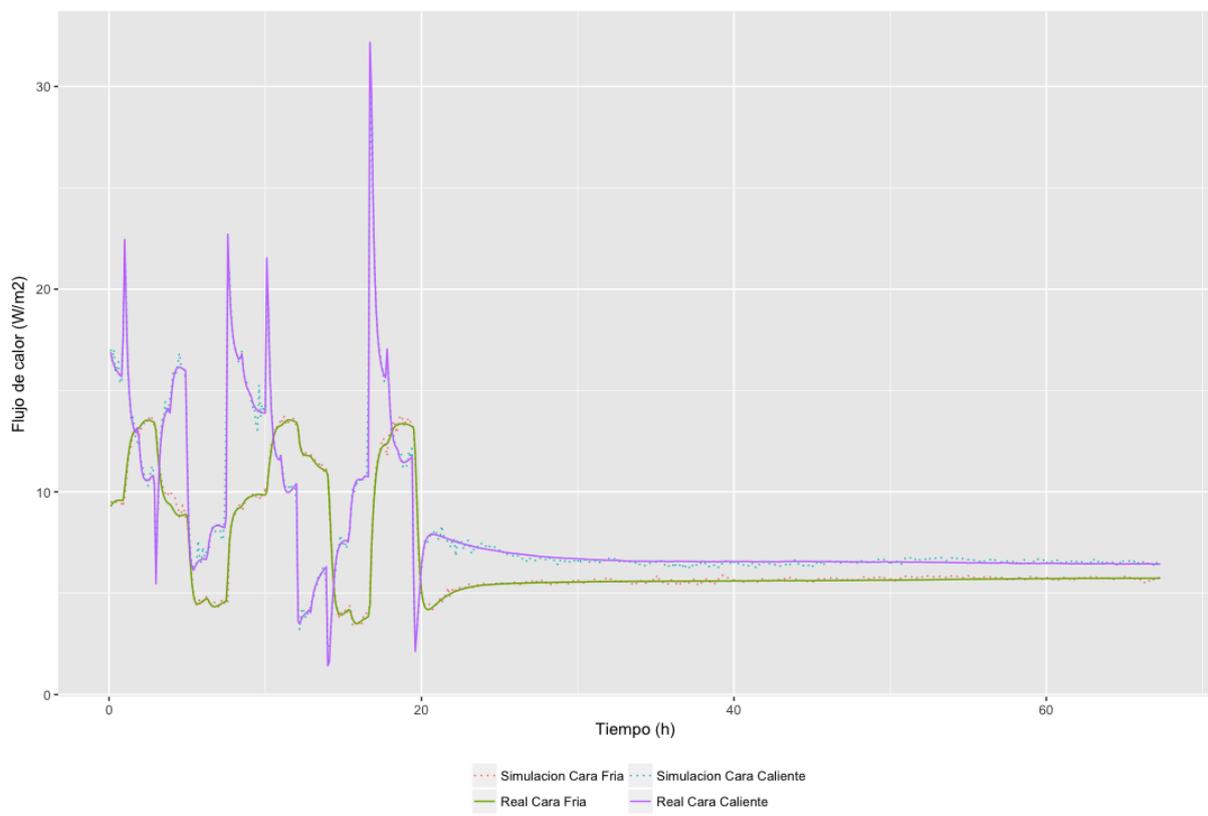


Figura 8.15: Resultados de la simulación del ensayo 2

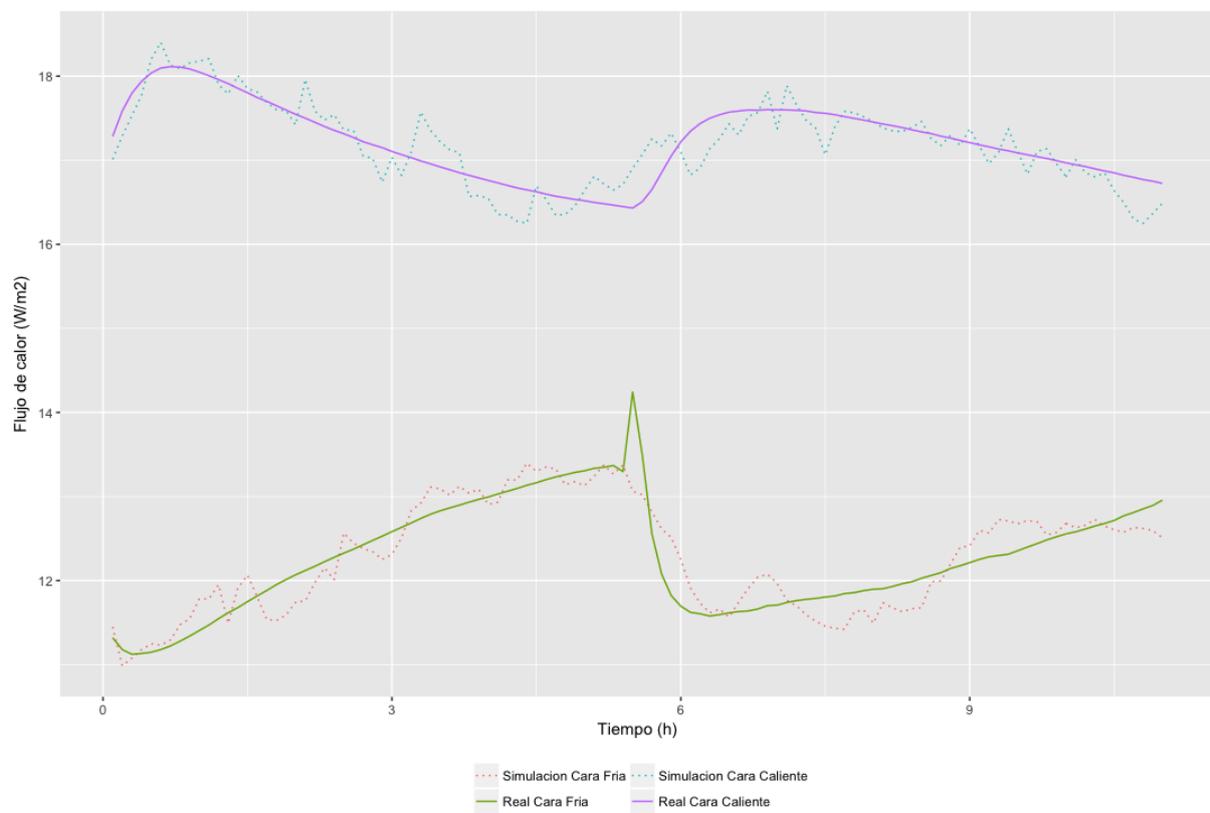


Figura 8.16: Resultados de la simulación del ensayo 3

temperatura en ambas caras. Para solucionar el problema, se vuelve a entrenar la red, pero añadiendo ahora a la información de entrenamiento los datos adicionales de estado estacionario, con igual temperatura en ambas caras, para todos los valores enteros entre 10 °C y 35 °C.

Se vuelve a entrenar la red con los nuevos datos añadidos, y se detiene el entrenamiento cuando el error cuadrático medio alcanza el valor de 0.0813<sup>16</sup>. Con la nueva red entrenada, se vuelven a simular los ensayos 1 a 3, además del comportamiento en estado estacionario.

En las figuras 8.17, 8.18 y 8.19 se muestra de nuevo el resultado de la simulación con la nueva red entrenada. Como se puede observar, se vuelve a obtener un buen ajuste de la simulación a los datos experimentales. En la tabla 8.1 se han añadido los resultados de simular el estado estacionario para varios valores, algunos de los cuales son de entrenamiento, y otros no se han incluido en el mismo<sup>17</sup>. Como se puede comprobar, incluso en los casos de los datos no incluidos en el entrenamiento, los flujos de calor se mantienen cercanos a cero.

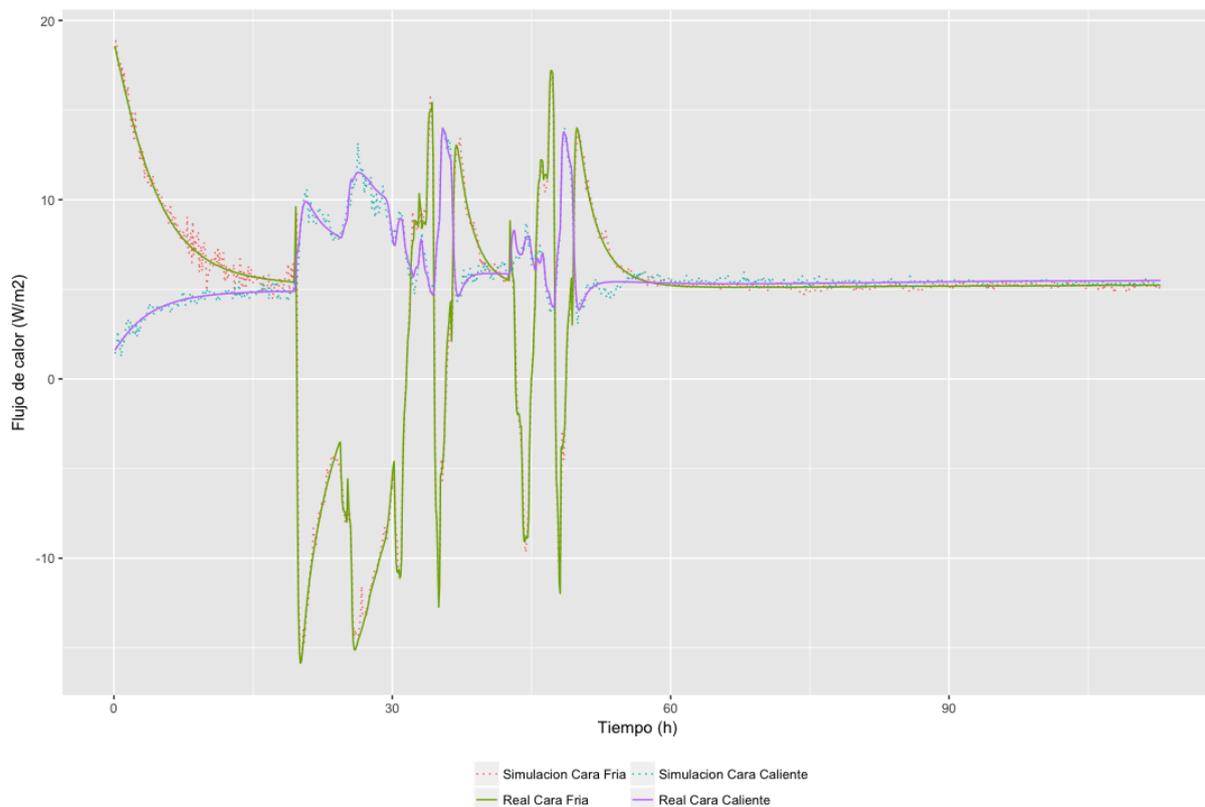


Figura 8.17: Resultados de la simulación del ensayo 1

<sup>16</sup>El valor de MSE obtenido es inferior al error medio cuadrático de medición de los fluxímetros, que es de 0.182

<sup>17</sup>Los datos de entrenamiento han sido números enteros entre 10 °C y 35 °C

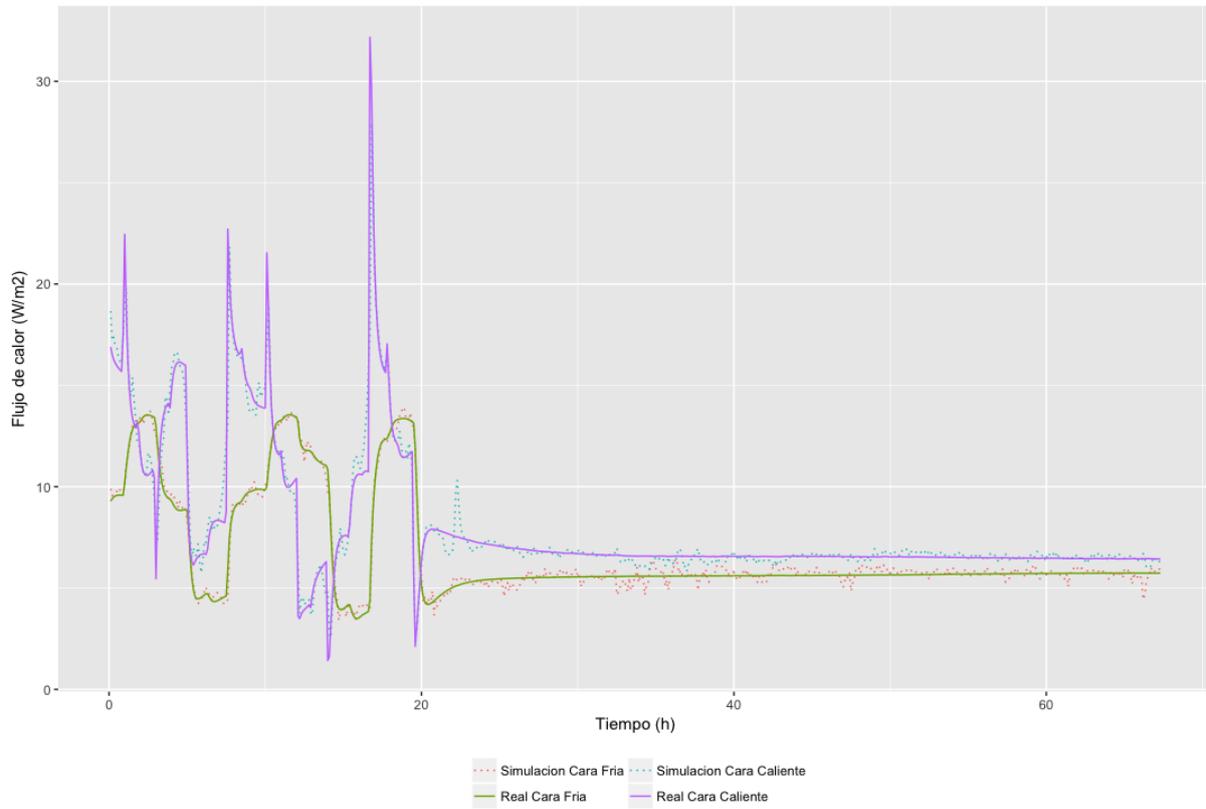


Figura 8.18: Resultados de la simulación del ensayo 2

Temp (°C)	Flujo ( $W/m^2$ )
9.0	0.0730
12.5	-0.0075
20.0	-0.0354
23.4	-0.0039
29.0	0.0110
35.8	0.0716

Tabla 8.1: Resultados de la simulación de estado estacionario

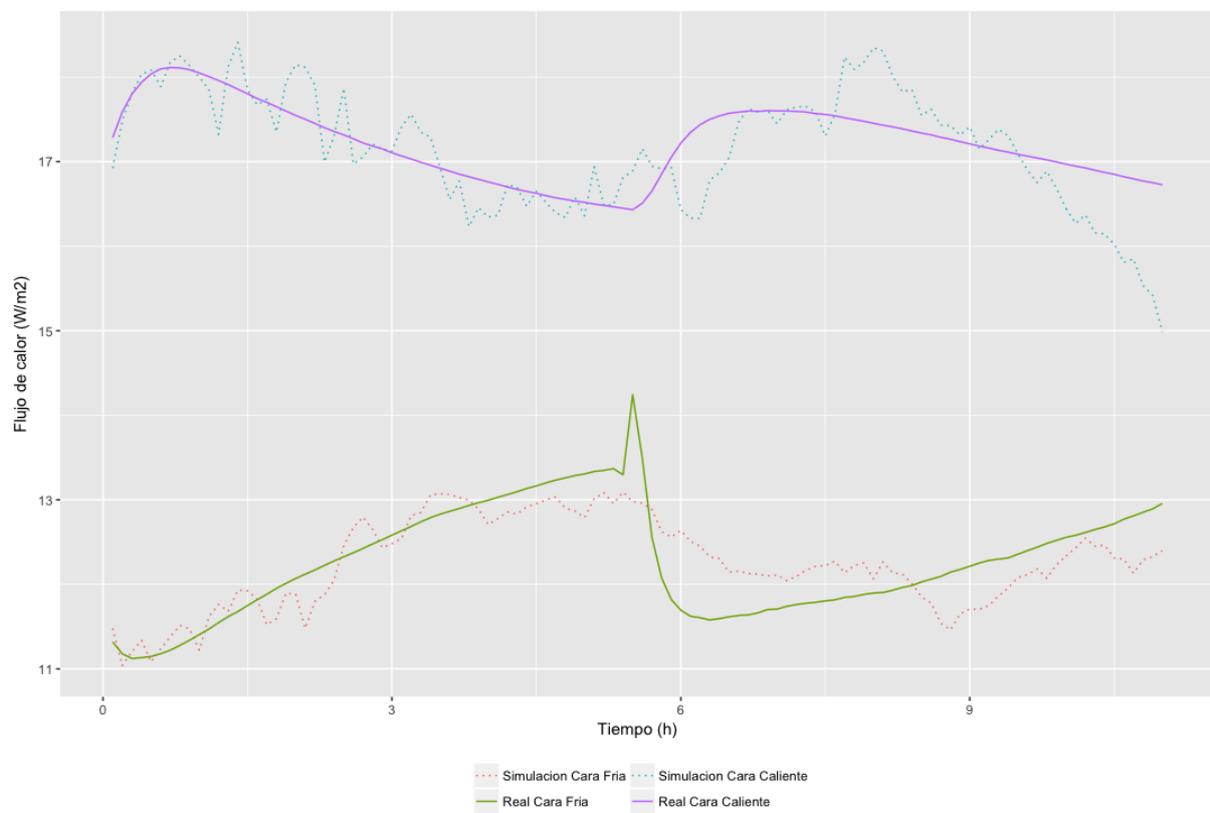


Figura 8.19: Resultados de la simulación del ensayo 3



#### 8.4.3.2. Análisis de sensibilidad y obtención de la red neuronal final

Como paso final para definir de manera definitiva la red neuronal que se va a emplear en los siguientes análisis, hay que comprobar la sensibilidad de la red obtenida, con respecto a los pequeños errores o variaciones de los datos de entrada. En el caso objeto de estudio, los únicos valores de entrada que utiliza esta red neuronal son las temperaturas en cada cara de la doble placa de Energain. Los datos empleados para el entrenamiento de la red se han medido con unos termopares con una precisión de  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ . Al mismo tiempo, para el entrenamiento se han usado los flujos de calor en ambas caras, que se miden con una precisión de  $\pm 5\% \text{ W/m}^2$ .

Estos datos indican que aunque los datos usados para el entrenamiento sean los datos medidos, los datos reales del ensayo pueden encontrarse dentro de la horquilla de valores dada por la precisión de las sondas. Por este motivo, se procede a analizar lo que sucede al hacer variar el valor de la temperatura dentro de ese margen de error, para ver si el resultado de la simulación se encuentra dentro de los valores de error admisibles por los fluxímetros. Para ello, se ha procedido a generar valores nuevos de temperatura, empleando todas las combinaciones posibles de sumar o restar a las temperaturas  $0.2^\circ\text{C}$ , y se han usado para simular el ensayo 1. Los resultados de estas simulaciones se pueden ver en la figura 8.20. En esta figura se han representado con una línea los valores medios del ensayo y de las simulaciones, mientras que se han representado como una banda el intervalo de variación tanto de las lecturas de los fluxímetros en los ensayos<sup>18</sup>, como la variación de los resultados de los ensayos al cambiar los valores de las variables de entrada. Como se puede observar en dicha figura, al variar las temperaturas dentro del rango de error de los termopares, el resultado de la red neuronal sigue la forma de la evolución real del flujo de calor, pero se desvía de manera notable con respecto a las mediciones obtenidas durante el ensayo.

Por este motivo, y tal y como se hizo en el Capítulo 9, se va a volver a entrenar la red neuronal añadiendo variaciones en las temperaturas dentro del rango de error, para añadir esa incertidumbre en el entrenamiento. Se hace variar por lo tanto las temperaturas en ambas caras de la muestra en el rango de  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ , y se vuelve a ensayar para que la variación del flujo de calor se mantenga dentro del rango de error de los fluxímetros, que es de  $\pm 5\%$  de la magnitud medida<sup>19</sup>. Se ha entrenado la red hasta que el valor del error cuadrático medio toma un valor de 0.0584 para los valores medidos, por debajo del correspondiente al error de los fluxímetros. Los resultados de la simulación para los tres ensayos analizados se representan en las figuras 8.21 a 8.26 representando también el ámbito de variación del flujo de calor en función de la incertidumbre en la medición de la temperatura.

Como se puede ver en las figuras, los resultados de la simulación se ajustan adecuadamente a los rangos de incertidumbre de medición de los fluxímetros. El único caso en el que se aprecia cierto desvío es la simulación de la cara caliente del ensayo 1 (Figura 8.22), aunque esta simulación mantiene la misma forma de la evolución real, y se encuentra muy cercana a los rangos de error.

<sup>18</sup>El error de lectura es comparativamente tan pequeño que prácticamente no se aprecia

<sup>19</sup>Corresponde a un valor de SME de 0.182 para el flujo de calor

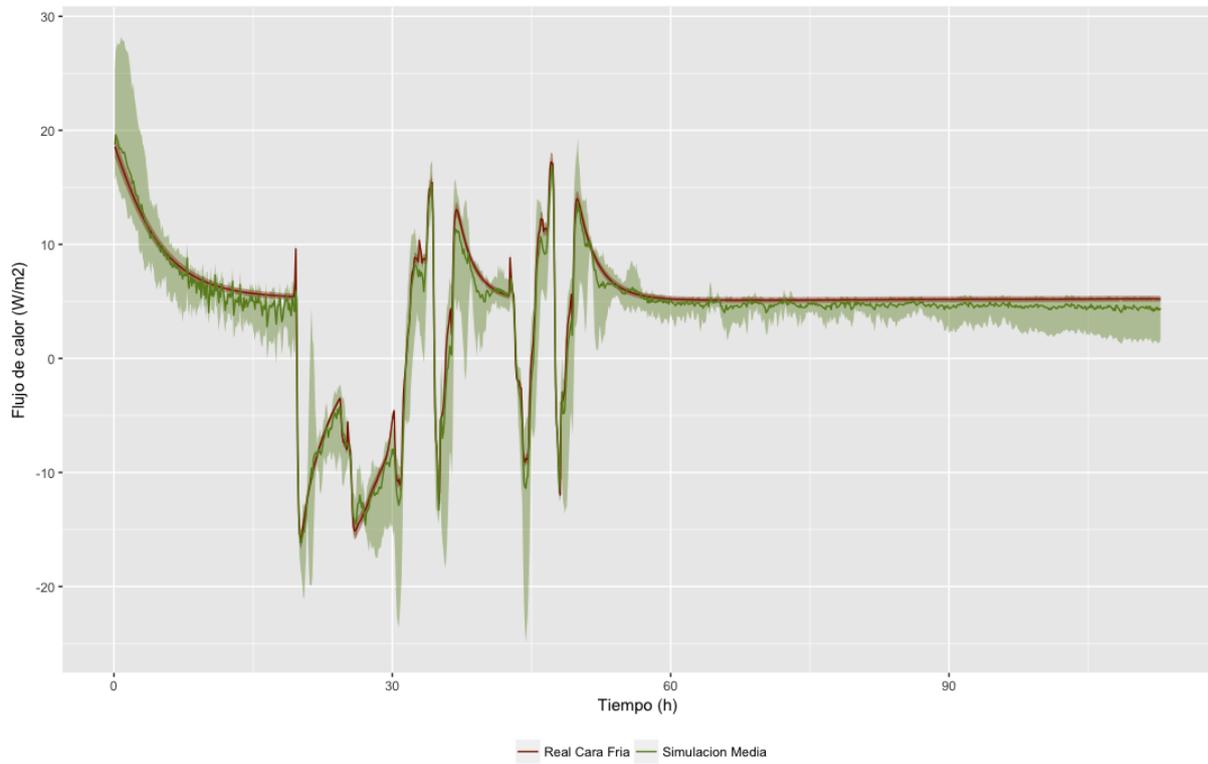


Figura 8.20: Resultados del análisis de sensibilidad en la cara fría para el ensayo 1

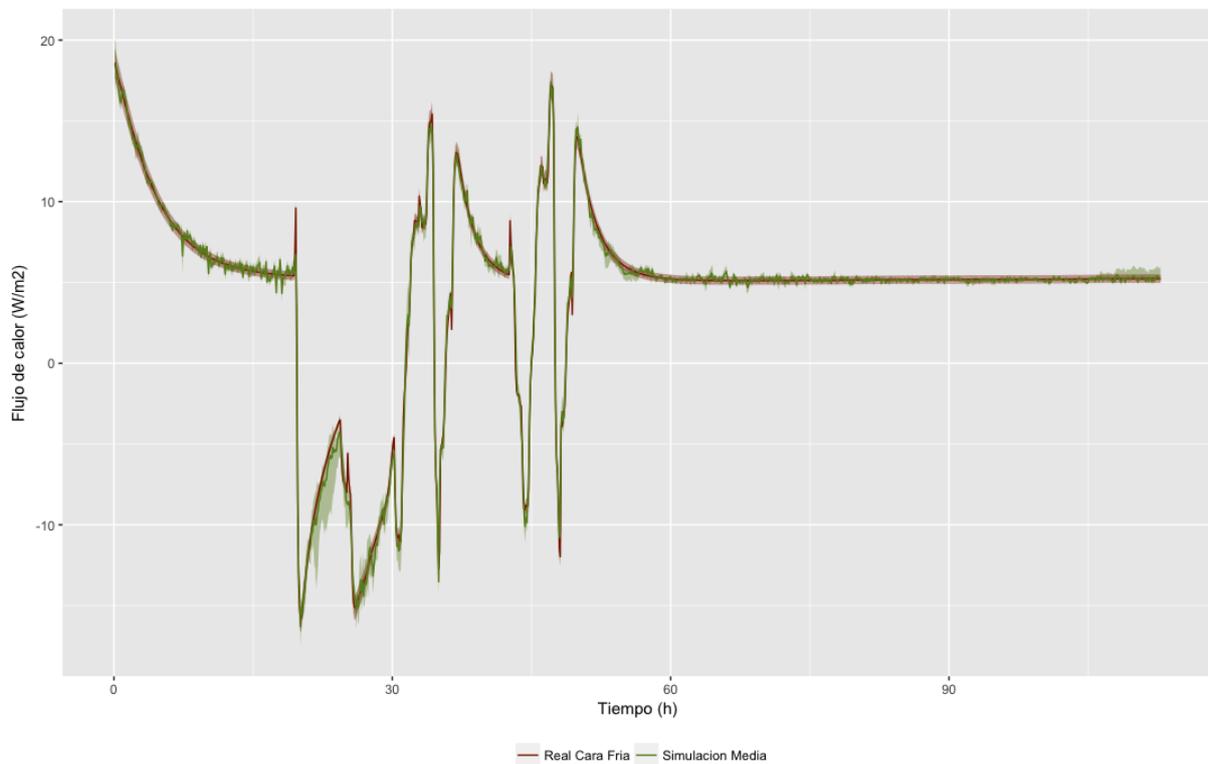


Figura 8.21: Resultados del análisis de sensibilidad final, cara fría, ensayo 1

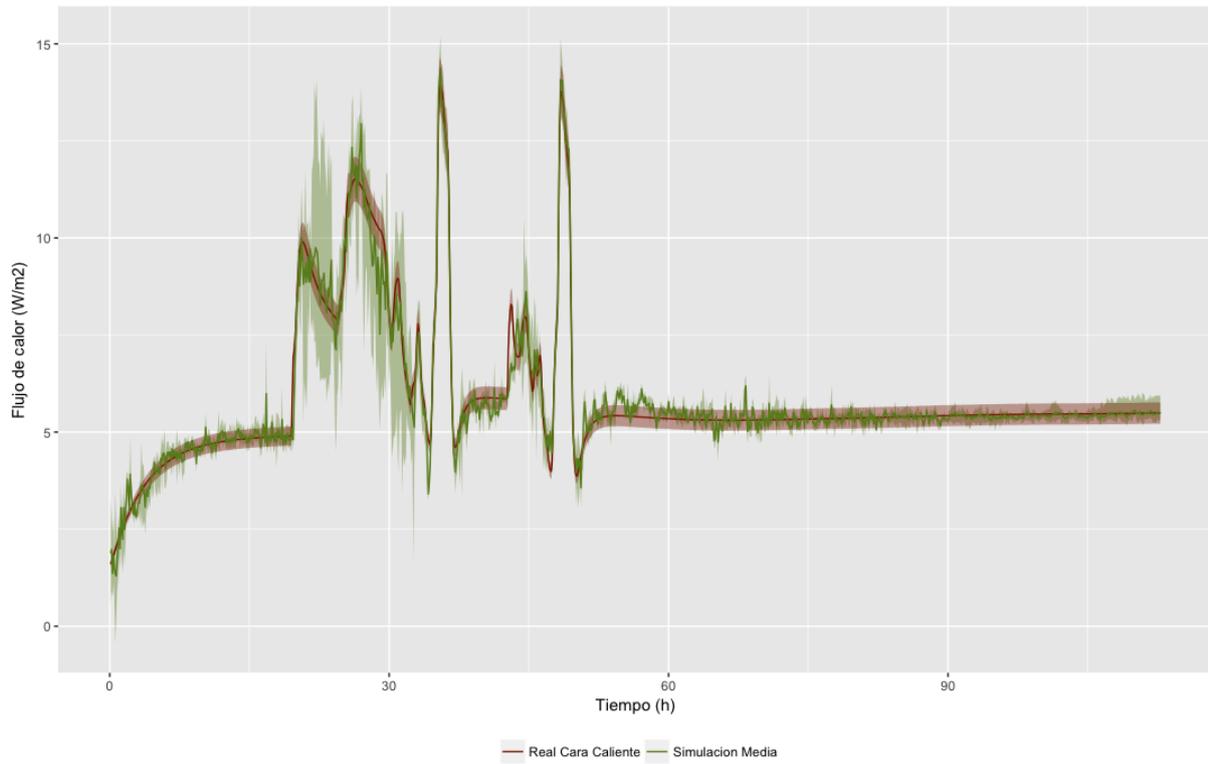


Figura 8.22: Resultados del análisis de sensibilidad final, cara caliente, ensayo 1

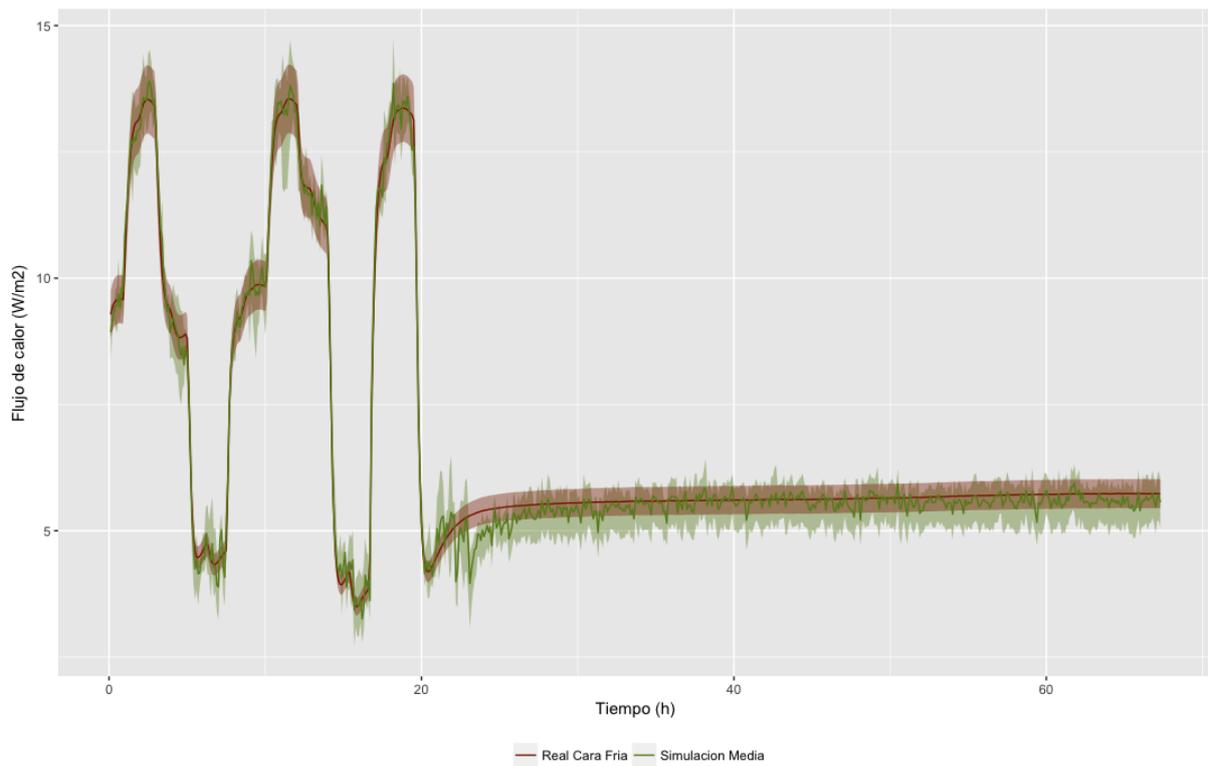


Figura 8.23: Resultados del análisis de sensibilidad final, cara fría, ensayo 2

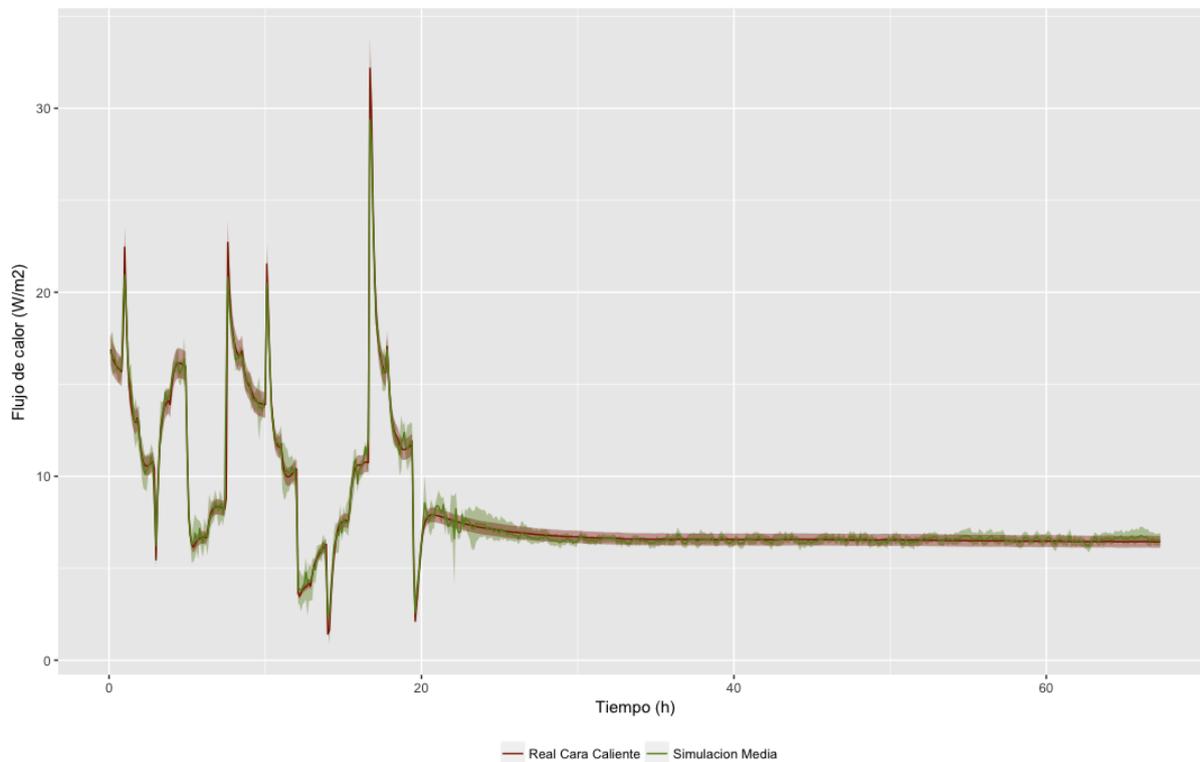


Figura 8.24: Resultados del análisis de sensibilidad final, cara caliente, ensayo 2

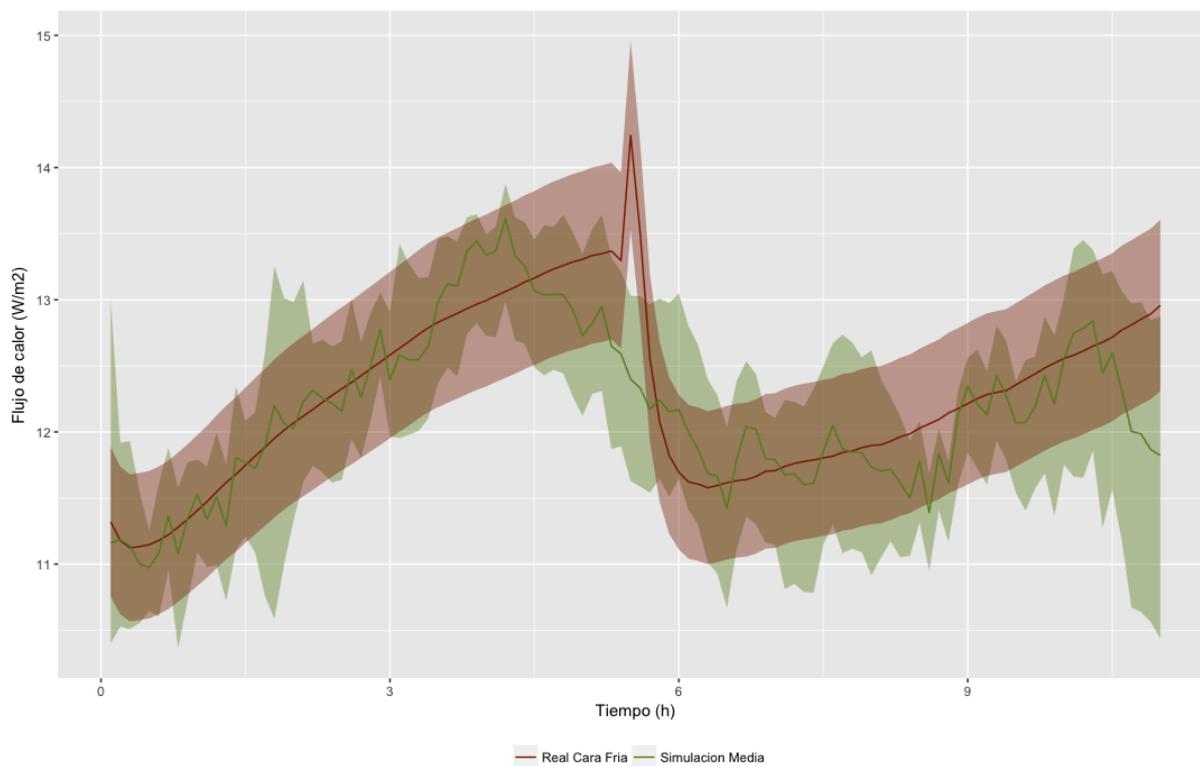


Figura 8.25: Resultados del análisis de sensibilidad final, cara fría, ensayo 3

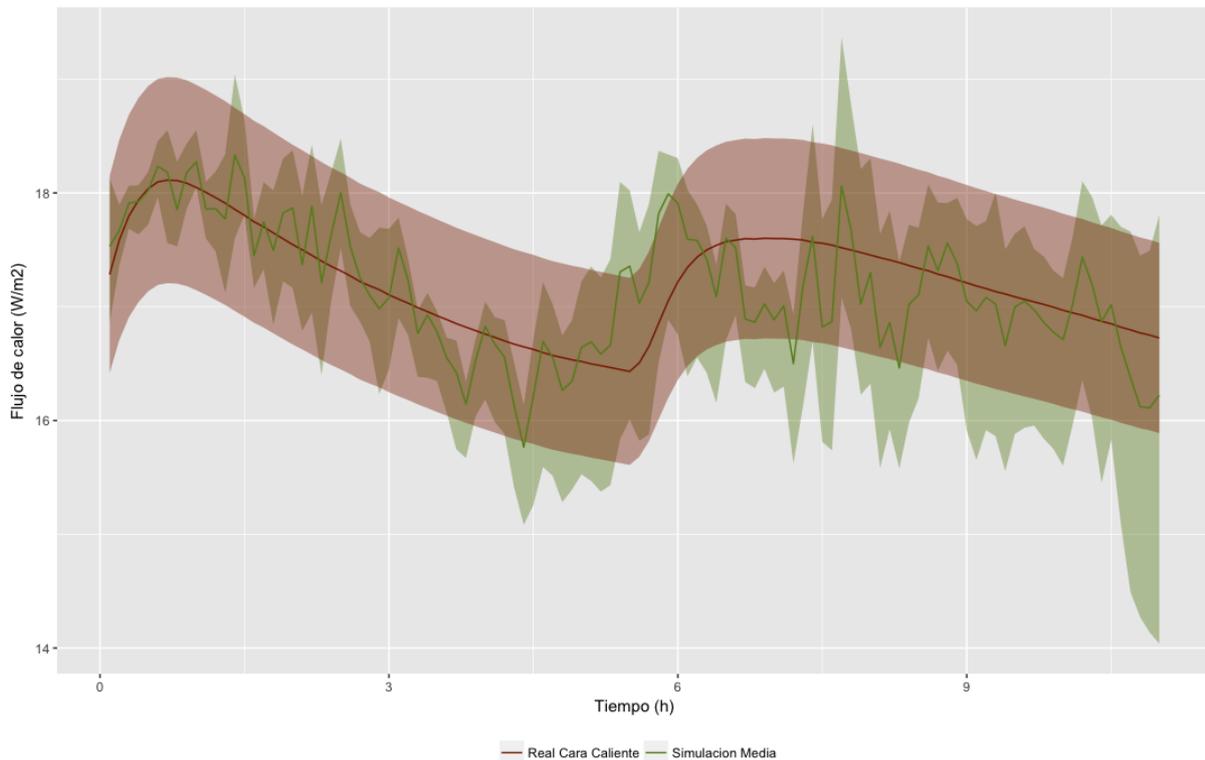


Figura 8.26: Resultados del análisis de sensibilidad final, cara caliente, ensayo 3

#### 8.4.4. Generalización de la red neuronal

Tal y como se ha visto hasta el momento, las redes neuronales parecen ser adecuadas para simular el comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase. A pesar de la naturaleza fuertemente no lineal del intercambio de calor durante el cambio de fase, las redes neuronales son capaces de reproducir con un buen ajuste los procesos ensayados en el conductivímetro.

Aún así, uno de los mayores problemas que pueden presentar las redes neuronales es la generalización, esto es, su capacidad de reproducir cualquier tipo de cambio, y no sólo aquellos procesos con los que ha sido entrenada. Una de las formas de mejorar la generalización de las redes, es emplear algoritmos de entrenamiento que minimicen el número de pesos y bias, como la reducción bayesiana que se ha empleado en este caso.

No existe un método para definir a priori si una red neuronal va a generalizar correctamente para todas distintas variaciones y procesos a los que se debe enfrentar, más allá de la prueba directa sobre diferentes evoluciones. Por ese motivo, se ha decidido calcular la respuesta de la red neuronal ante una variación de temperaturas determinada: una señal de rampa, con un aumento de temperatura en una de las superficies, de  $0.1^{\circ}\text{C}/6$  min, desde  $21^{\circ}\text{C}$  a  $23^{\circ}\text{C}$ , manteniéndose posteriormente a  $23^{\circ}\text{C}$ , mientras la otra superficie se mantiene constante a  $21^{\circ}\text{C}$ .

Ante este cambio de temperaturas, el flujo de calor natural debería ser ascendente, con

un quiebro durante el cambio de fase, para estabilizarse finalmente a un valor constante. Sin embargo, el resultado de esta simulación es el que se representa en la figura 8.27. Como se puede observar, el resultado obtenido dista mucho de lo que se debería esperar.

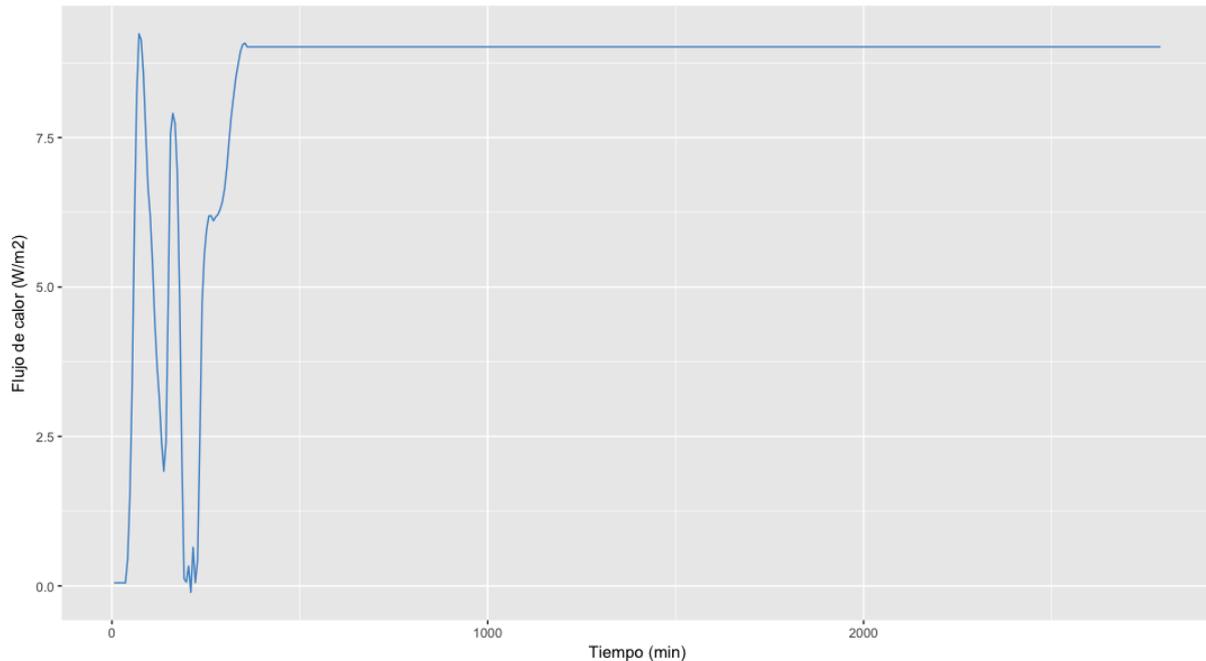


Figura 8.27: Resultado de la simulación de rampa de temperaturas

Este resultado demuestra la mala generalización de la red neuronal obtenida. Surge por lo tanto la duda, de si este fallo de generalización se debe en exclusiva a la red ensayada, o se trata de un problema general de las redes neuronales ante el comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase.

Para terminar de resolver este dilema, se ha decidido entrenar una serie de redes neuronales adicionales, con arquitecturas más complejas, que en principio deberían ser adecuadas para resolver los problemas más complicados. En concreto, se han entrenado redes neuronales con varias capas ocultas: con dos capas ocultas, y 20-20, 30-20 y 30-30 neuronas en las capas ocultas, y una red de tres capas ocultas con 25 neuronas en cada capa. Todas las redes obtenidas se han entrenado siguiendo los mismos criterios fijados anteriormente.

Simulando las redes neuronales ante la variación de temperatura en rampa descrita, el resultado obtenido es el representado en la figura 8.28. Tal y como se puede observar en esta figura, los resultados de cada una de las redes son a cada cual más dispares, y ninguna de las simulaciones se corresponde con el resultado esperable. Por este motivo se concluye que las redes neuronales presentan una mala generalización para el análisis del comportamiento de los materiales de cambio de fase.

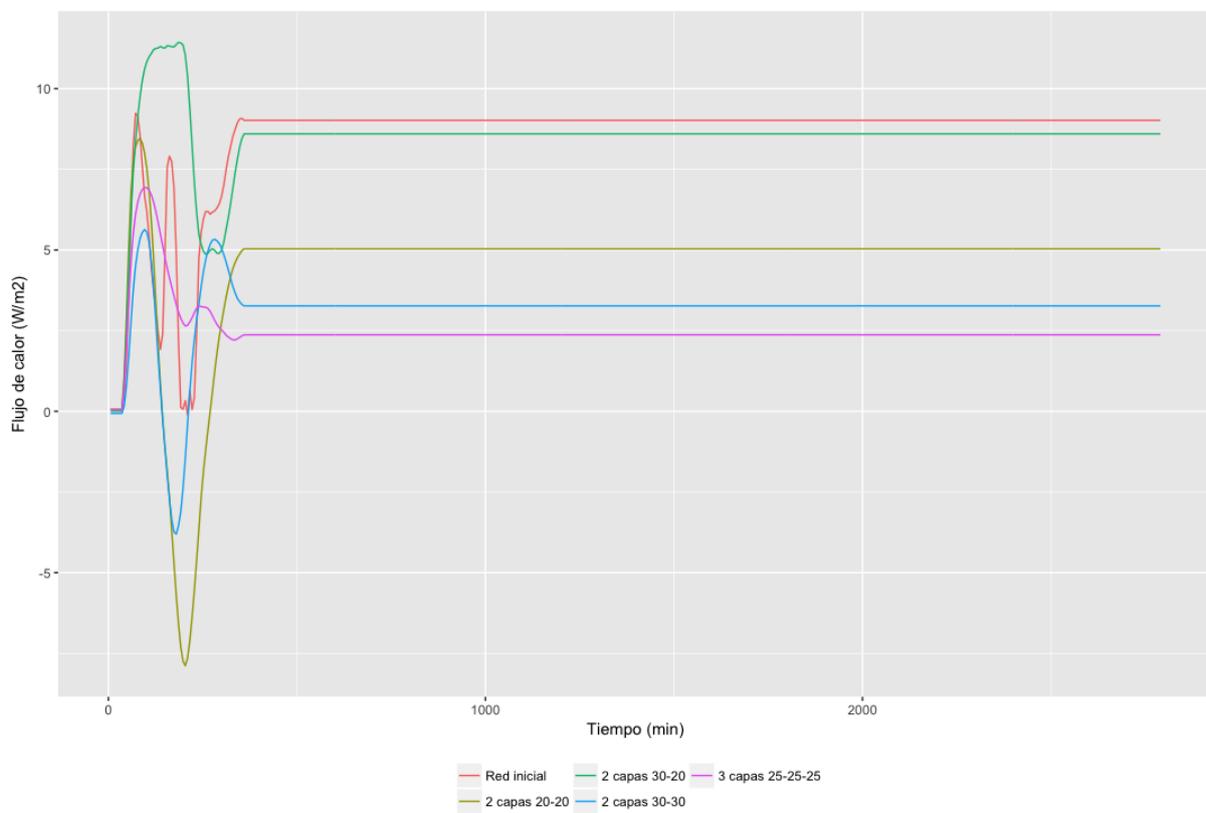


Figura 8.28: Resultado de la simulación de rampa de temperaturas

## 8.5. Conclusiones

Se ha aplicado el método de las redes neuronales sobre los datos del ensayo de conductivímetro descrito en el capítulo 6, para ambos materiales, el Termiplast y el Energain, demostrándose un buen ajuste de las redes entrenadas respecto a los datos del ensayo. Estas redes presentan la ventaja de obtener buenos ajustes sobre los datos del ensayo, con la ventaja comparativa de requerir tiempos de simulación notablemente inferiores al método de diferencias finitas. Como contrapartida, el tiempo de entrenamiento de la red se puede dilatar durante varias horas, pero al tener que realizarse una única vez para cada configuración del material, no supone un impedimento importante.

A pesar de la evidente ventaja que suponen las redes neuronales tanto a nivel de ajuste a los datos, o sensibilidad a los errores de medida, la gran desventaja que han demostrado en esta aplicación son los problemas de generalización. Si bien la red consigue un buen ajuste a los datos de entrenamiento, posiblemente debido a la gran disparidad de condiciones bajo las que son necesarias simular su respuesta con posterioridad, hace que las redes no sean capaces de dar una respuesta adecuada ante problemas que difieren en gran medida a las condiciones bajo las que han sido entrenadas. Una posible solución sería añadir más valores de ensayo al entrenamiento de la red, pero esto dificulta en gran medida el desarrollo de esta técnica, alargando tanto el proceso de obtención de datos experimentales, como el entrenamiento de la red.



## Capítulo 9

# Comparativa de Métodos

---

9.1. Requisitos del algoritmo de cálculo . . . . .	168
9.2. Elección del método a emplear . . . . .	170

---



Tal y como se acaba de exponer en los capítulos anteriores, se han medido de manera experimental las propiedades termofísicas de dos materiales de cambio de fase, y su comportamiento térmico ante el cambio de temperaturas superficiales (Parte II), y posteriormente se han analizado distintos métodos para simular el comportamiento de dichos materiales (capítulos 7 y 8).

Se ha optado por comparar estos dos métodos de modelización:

- Modelo de discretización en diferencias finitas: es probablemente el modelo más habitual para este tipo de sistemas, como ya se ha visto en el capítulo 2 sobre el Estado del Arte. Este método se basa en la diferenciación de las ecuaciones físicas de la transferencia de calor, usando las propiedades físicas de los materiales. Este modelo se analiza en el capítulo 7.
- Modelo indirecto: Se trata de métodos de aprendizaje automático, que utilizan los datos experimentales para ajustar los parámetros del modelo. En este caso se ha optado por el uso de los modelos de redes neuronales. Este modelo se analiza en el capítulo 8.

A continuación se van a analizar los requisitos del modelo de simulación, y se elegirá el más adecuado para el caso de estudio.

## 9.1. Requisitos del algoritmo de cálculo

Para determinar cuál de los algoritmos presenta mejor comportamiento se van a analizar todos los aspectos marcados previamente como prerrequisito, en el apartado 3.1:

- Eficiencia: La red neuronal presenta mejor eficiencia que el método de diferencias finitas, necesitando un tiempo de cálculo mucho menor (1 segundo frente a 5 minutos para el ensayo del conductivímetro), y mejor ajuste ( $\pm 0.45 \text{ W/m}^2$  de error medio absoluto, frente a  $\pm 5.7 \text{ W/m}^2$ )
- Precisión ajustable: El método de diferencias finitas no permite gran ajuste en su exactitud, debido a las limitaciones impuestas por el criterio de estabilidad. Además, debido a que el orden del error está directamente ligado con los intervalos de discretización elegidos<sup>1</sup>, intentar mejorar el ajuste de las simulaciones sólo es posible a costa de un gran aumento del tiempo de cálculo. Por su parte, la red neuronal no requeriría de ajustes en su precisión, debido a su gran velocidad de cálculo, que es independiente del grado de ajuste elegido. Aún así, se podría emplear redes con menor número de neuronas para cálculos rápidos, y posteriormente emplear una red con mayor número de neuronas y mejor ajuste.
- Robustez: Ambos métodos presentan buena robustez desde la perspectiva de la programación, sin la necesidad de introducir criterios de selección de datos. Respecto a

<sup>1</sup>El orden del error del método empleado es de  $O(\Delta t + \Delta x^2)$

la perspectiva estadística, la red neuronal presenta menor sensibilidad, al no necesitar asunciones previas respecto a las propiedades de la muestra<sup>2</sup>, e incluir la incertidumbre de medición en su entrenamiento.

- **Facilidad de implementación:** El criterio de estabilidad del método de diferencias finitas, impone unos intervalos temporales muy inferiores a los empleados en los programas de cálculo de edificios completos, con lo que este algoritmo requeriría la implementación de un sistema de acoplamiento entre los intervalos temporales, o el empleo del método de diferencias finitas para el muro completo. Por su parte, la red neuronal no presenta restricciones respecto al intervalo temporal, con lo que se podría aplicar directamente a los programas de edificios completos, con lo que su implementación es más sencilla.
- **Escalabilidad:** El algoritmo en diferencias finitas, al precisar de una subdivisión espacial para su implementación, presenta un coste computacional que va aumentando al aumentar el espesor del PCM empleado, al precisar mayor número de nodos espaciales. Por su parte, la red neuronal no presenta cambios en su coste computacional con respecto al espesor ni al tamaño de la muestra.

Además de lo ya expuesto, hay que tener en cuenta estos otros aspectos:

- **Mayor versatilidad de la red neuronal:** para desarrollar el algoritmo en diferencias finitas, se han realizado simplificaciones, como suponer flujo de calor perfectamente monodimensional, ausencia de convección en la fase líquida, homogeneidad del sistema, etc. Sin embargo con las redes neuronales no es necesario realizar este tipo de simplificaciones, al partir de datos experimentales, y por lo tanto se pueden emplear para configuraciones más complejas, con gran heterogeneidad del sistema, o con presencia de convección en la fase líquida.
- **Necesidad de datos previos para la red neuronal:** El mayor problema del uso de redes neuronales es la necesidad de disponer de datos experimentales para entrenarlas. Por su parte, el algoritmo en diferencias finitas se basa en exclusiva en las propiedades termofísicas del material a simular, que deben ser medidos también con antelación, aunque en la actualidad se encuentran disponibles libremente muchos de los datos necesarios.

Sin embargo, las redes neuronales han demostrado una mala generalización, es decir, no son capaces de predecir correctamente valores diferentes de aquellos con los que han sido entrenadas. Esto supone un impedimento importante para su uso en la simulación de cerramientos de edificios, puesto que las condiciones ambientales son demasiado cambiantes para poder entrenar la red bajo todas las variaciones posibles.

---

<sup>2</sup>Al no precisar los datos de entrada de conductividad, densidad, o entalpía, no presenta sensibilidad a las mismas



## 9.2. Elección del método a emplear

En vista del análisis previo, a pesar de que el método de redes neuronales parece más prometedor para el análisis de los materiales de cambio de fase bajo condiciones ambientales controladas<sup>3</sup>, la mala generalización que presenta este método por un lado, unido a la gran variabilidad de las condiciones ambientales bajo las que se debe a simular el mismo, hacen inviable su uso en el presente trabajo.

Se decide por lo tanto emplear el método de diferencias finitas implícito, al tener un uso más general. El empleo de este método supone por un lado un mayor coste de cálculo, con tiempos de simulación más prolongados. Además, y debido a los cortos intervalos temporales impuestos por un lado por la condición de estabilidad, y por otro al orden del error, no se va a poder implementar este método de cálculo junto con los métodos habituales para la simulación de la parte convencional de los cerramientos, como sería el caso del método de CTFs, con lo que el muro compuesto completo deberá simularse mediante el método de diferencias finitas propuesto.

En el siguiente capítulo se pasará a comentar el método de cálculo del muro completo, con inclusión tanto de materiales convencionales, como de materiales de cambio de fase.

---

<sup>3</sup>Condiciones bajo las que se pueda ensayar previamente para entrenar la red posteriormente en esas mismas condiciones

## **Parte IV**

# **Análisis de propiedades de PCMs**



## Capítulo 10

# Implementación del Método Final

---

<b>10.1. Algoritmo de simulación de muros compuestos . . . . .</b>	<b>174</b>
<b>10.2. Método de cálculo de los nodos del cerramiento . . . . .</b>	<b>175</b>
10.2.1. Nodo interior . . . . .	175
10.2.2. Nodos frontera . . . . .	176
10.2.3. Balance del aire interior . . . . .	179
10.2.4. Condiciones de contorno exterior . . . . .	182
10.2.5. Entrada y salida de datos . . . . .	183

---



Como se ha visto en la comparativa de métodos del capítulo 9, el método de redes neuronales a priori es el que muestra mejor comportamiento respecto a los datos experimentales de los ensayos, pero es incapaz de dar una respuesta coherente al intentar simular el comportamiento de los PCMs bajo condiciones diferentes a las de entrenamiento. Por ese motivo, se decide optar por el método en diferencias finitas, que a pesar de presentar un comportamiento más modesto a la hora de simular el comportamiento de los PCMs, con un ajuste peor a los datos experimentales y un coste computacional mayor, aún así da resultados aceptables.

Con el método en diferencias finitas elegido, se va a proceder a desarrollar el modelado de una serie de cerramientos compuestos, con materiales convencionales y una capa con material de cambio de fase. En este capítulo se van a describir las consideraciones iniciales para la simulación de estos muros compuestos, y el propio programa de cálculo desarrollado para realizar simular las distintas configuraciones de muro posibles.

## 10.1. Algoritmo de simulación de muros compuestos

Tal y como se ha explicado previamente, el método de cálculo para los materiales de cambio de fase por el que se ha optado definitivamente es el método de la entalpía, en diferencias finitas, explícito. De todos modos, el objetivo final del presente trabajo es simular un muro compuesto, con inclusión de PCM, utilizado como cerramiento de un edificio.

La primera decisión a tomar para la simulación del muro compuesto, es la manera en la que incluir los materiales convencionales en el algoritmo. El método más habitual para el tratamiento de la simulación dinámica de muros convencionales, es a través de las funciones de transferencia de la conducción o CTFs. Estas funciones presentan la ventaja de replicar adecuadamente el comportamiento de este tipo de cerramientos, pero presentan un mal comportamiento para intervalos temporales cortos, en los que se vuelven inestables [93].

El criterio de estabilidad impuesta por el uso del método explícito para los materiales de cambio de fase, obliga al empleo de intervalos temporales muy cortos, inferiores al segundo, para la simulación de todo el muro. De otra forma, no sería posible aplicar condiciones de contorno en las superficies de contacto entre las capas de material convencional y las capas de materiales de cambio de fase. Queda descartado por lo tanto el empleo de las funciones de transferencia de la conducción para la parte convencional de los cerramientos.

En vista de los cortos intervalos temporales necesarios, la propuesta más lógica es el empleo del mismo método en diferencias finitas para los materiales convencionales, usando por lo tanto el mismo método en todo el cerramiento, tanto para los materiales convencionales, como para los materiales de cambio de fase.

En los siguientes apartados se van a detallar las ecuaciones empleadas en el algoritmo que se ha programado.

## 10.2. Método de cálculo de los nodos del cerramiento

### 10.2.1. Nodo interior

Los nodos interiores son aquellos que se encuentran en el interior de cada capa, rodeado de otros nodos del mismo material. Se trata de la situación representada en la figura 10.1. Este tipo de nodos sólo se dan en el interior de los materiales convencionales, y de los materiales de cambio de fase.

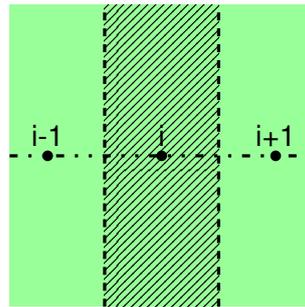


Figura 10.1: Nodo interior

Las ecuaciones de estos nodos interiores se obtienen de diferenciar en el espacio y en el tiempo la ecuación de la difusión del calor:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (10.1)$$

Tal y como se explicó en el apartado 7.2, diferenciando la ecuación de difusión del calor en el espacio y en el tiempo, de forma explícita, se obtiene la relación para los nodos interiores:

$$\rho \frac{h_i^{t+1} - h_i^t}{\Delta t} = k^- \frac{T_{i-1}^t - T_i^t}{\Delta x^2} + k^+ \frac{T_{i+1}^t - T_i^t}{\Delta x^2} \quad (10.2)$$

#### 10.2.1.1. Nodo interior convencional

En los materiales convencionales, se ha supuesto que las propiedades termofísicas son constantes e independientes de la temperatura, tal y como se suele realizar en el análisis del comportamiento térmico de este tipo de materiales. Reordenando y agrupando los elementos de la ecuación 10.2, se obtiene la siguiente expresión:

$$T_i^{t+1} = T_i^t + \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{i-1}^t - 2T_i^t + T_{i+1}^t) \quad (10.3)$$

#### 10.2.1.2. Nodo interior PCM

En el caso de los materiales de cambio de fase, se ha supuesto que la densidad no varía con la temperatura, pero la conductividad varía entre las fases líquida y sólida, tal y como se explicó en el apartado 7.2. La ecuación para los nodos interiores queda por lo tanto como sigue:

$$h_i^{t+1} = h_i^t + \frac{\Delta t}{\rho \Delta x^2} (k_-^t (T_{i-1}^t - T_i^t) + k_+^t (T_{i+1}^t - T_i^t)) \quad (10.4)$$

Con esta expresión, se calculan los valores de la entalpía en el nuevo instante  $t + 1$ , en función de la temperatura en el instante  $t$ , para posteriormente calcular los valores de la temperatura en el nuevo instante  $t + 1$  utilizando para ello la relación entre temperatura y la entalpía del material de cambio de fase.

## 10.2.2. Nodos frontera

Los nodos frontera son aquellos que se dan en las intercaras en el contacto entre dos capas del muro, o entre el muro y la convección exterior. Existen varias combinaciones diferentes de contacto, lo que conlleva distintas ecuaciones en cada caso. Se exponen a continuación cada una de las expresiones utilizadas en los cálculos, que se han obtenido aplicando las condiciones de continuidad de flujo de calor y temperaturas en la interfase.

### 10.2.2.1. Convección sobre superficie convencional

En cada una de las superficies del muro compuesto, el material está en contacto con aire en movimiento, provocando un intercambio de calor por convección entre el aire y el muro. Esta situación se representa en la figura 10.2.

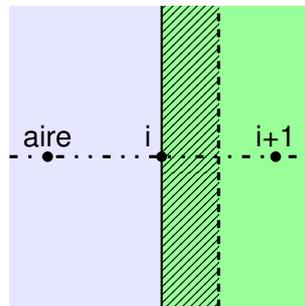


Figura 10.2: Convección en superficie

En esta situación, el nodo del material dispone sólo la mitad del espesor del nodo normal,  $\Delta x/2$ . Además la convección se representa en este caso mediante la resistencia térmica superficial de convección,  $R_t^1$ .

Aplicando como se ha comentado con anterioridad las condiciones de continuidad de flujo de calor y temperatura en esta intercara, se obtiene la siguiente expresión:

$$T_i^{t+1} = T_i^t + \frac{2\Delta t}{R_t \rho c_p \Delta x} (T_{aire}^t - T_i^t) + 2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{i+1}^t - T_i^t) \quad (10.5)$$

<sup>1</sup>Como se verá en el apartado 10.2.4, en la superficie exterior además de convección con el aire, se dará un intercambio radiativo tanto con el entorno, como con la radiación proveniente del sol. Esto se solventará mediante el uso de la temperatura sol-aire, de manera que no será necesario modificar las expresiones aquí obtenidas

Para los valores de la resistencia superficial de convección, se han empleado los valores de la norma UNE-EN ISO 6946 ( $R_{te} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  y  $R_{ti} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ).

### 10.2.2.2. Convección sobre PCM

La situación de una capa de material de cambio de fase en contacto con el aire es similar al de un material convencional, y por lo tanto sigue siendo válido el esquema representado en la figura 10.2. La diferencia en este caso es que es necesario usar la entalpía en la resolución de las ecuaciones, y por lo tanto la expresión a emplear es la siguiente:

$$h_i^{t+1} = h_i^t + \frac{2\Delta t}{R_t \rho \Delta x} (T_{aire}^t - T_i^t) + 2 \frac{k^t}{\rho} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{i+1}^t - T_i^t) \quad (10.6)$$

De esta ecuación, se obtiene el valor de la entalpía en el nuevo instante para el nodo superficial, y aplicando la relación entre entalpía y temperatura para el material de cambio de fase, se consigue el nuevo valor de la temperatura superficial.

Igual que en el caso de un material convencional, para los valores de la resistencia superficial de convección, se han empleado los valores de la norma UNE-EN ISO 6946 ( $R_{te} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  y  $R_{ti} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ).

### 10.2.2.3. Contacto entre dos capas convencionales

En un muro convencional es muy frecuente la configuración con varias capas de materiales sólidos convencionales. En dicha situación, en la cara de contacto entre ambos materiales también deben cumplirse las condiciones de continuidad del flujo de calor y temperatura. Esta situación de contacto entre dos materiales A y B, se representa en la figura 10.3.

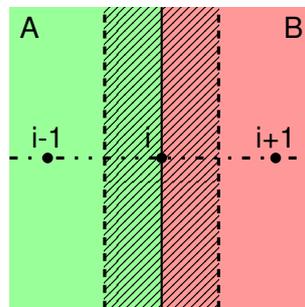


Figura 10.3: Contacto entre dos sólidos convencionales

Para la resolución de este tipo de contacto, se utiliza la siguiente expresión:

$$T_i^{t+1} = T_i^t + \frac{2}{\rho_{AC} c_{pA} + \rho_{BC} c_{pB}} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} [k_A (T_{i-1}^t - T_i^t) + k_B (T_{i+1}^t - T_i^t)] \quad (10.7)$$

#### 10.2.2.4. Contacto convencional-PCM

En las configuraciones propuestas sólo se considera una única capa de PCM en el muro compuesto. Por ese motivo, no se tiene en cuenta la posibilidad del contacto entre dos capas de materiales de cambio de fase, y sólo es posible el contacto entre un material convencional y un material de cambio de fase, como se representa en la figura 10.4.

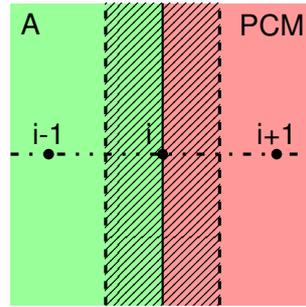


Figura 10.4: Contacto convencional-PCM

Para resolver esta condición, se utiliza la siguiente expresión:

$$h_i^{t+1} = h_i^t + \frac{2}{\rho_{PCM}} \left[ k_A (T_{i-1}^t + T_i^t) + k_{PCM}^t (T_{i+1}^t + T_i^t) - \rho_{ACpA} \frac{\Delta x^2}{2\Delta t} (T_i^{t+1} - T_i^t) \right] \quad (10.8)$$

En esta ocasión, y tal y como se puede observar en la ecuación, la entalpía del nodo de intercara del nuevo intervalo temporal  $t + 1$ , depende de la temperatura del mismo instante. Se tiene por lo tanto una expresión implícita, en la que se tiene que resolver al mismo tiempo el valor de la entalpía y de la temperatura.

Para solucionar este problema, se decide resolver la ecuación de manera iterativa. Como punto de partida, se considera la temperatura del instante  $t + 1$  igual a la del instante anterior  $t$ . Con ese valor se calcula la entalpía mediante la ecuación anterior, y esa nueva entalpía se emplea para calcular una nueva aproximación de la temperatura en el instante  $t + 1$ . Con este nuevo valor de temperatura se recalcula la entalpía, y así sucesivamente hasta que los valores converjan.

#### 10.2.2.5. Cámara de aire entre capas convencionales

La configuración base del muro a ensayar está conformada por una doble hoja en fábrica de ladrillo, con una cámara de aire intermedia. Esta cámara de aire está representada térmicamente por su resistencia térmica, lo que supone una variación a tener en cuenta en las ecuaciones de transferencia de calor. La situación se representa en la figura 10.5.

Tal y como se ha comentado, la cámara de aire se define en función de la resistencia térmica de la misma, con lo que la ecuación para el cálculo de ese nodo de frontera es la siguiente:

$$T_i^{t+1} = T_i^t + 2\alpha_A \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{i-1}^t - T_i^t) + \frac{2}{\rho_{ACpA}} \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{T_j^t - T_i^t}{R_t} \quad (10.9)$$

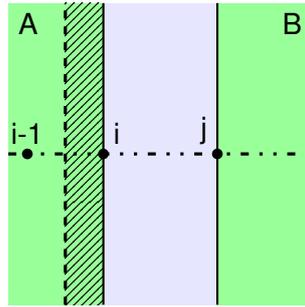


Figura 10.5: Cámara de aire entre capas convencionales

### 10.2.2.6. Cámara de aire con PCM

En el caso de una cámara de aire en contacto con un material de cambio de fase, el esquema del muro sigue siendo el de la figura 10.5, pero en esta ocasión para el cálculo de la cámara de aire es necesario emplear la entalpía del nodo de superficie. Teniendo esto en consideración, se obtiene la siguiente expresión matemática:

$$h_i^{t+1} = h_i^t + 2 \frac{k^t}{\rho} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{i-1}^t - T_i^t) + \frac{2}{\rho c_p} \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{T_j^t - T_i^t}{R_t} \quad (10.10)$$

### 10.2.3. Balance del aire interior

Las condiciones del interior del muro, están fuertemente ligadas a la geometría y el uso de dicho espacio. Factores como la carga interna, el perfil de uso, las ganancias exteriores por la entrada de radiación solar, el volumen total del aire del espacio interior, o las estrategias de acondicionamiento<sup>2</sup>, afectan al balance total de energía interior, y por lo tanto a su temperatura.

Existe gran disparidad de usos y geometrías de espacios, lo que imposibilita definir un único modelo que permita representar todas las configuraciones posibles. Por este motivo, se ha optado por plantear una configuración concreta, pero diseñar el algoritmo de forma que permita en el futuro aplicar configuraciones diferentes.

Se ha decidido simular una sala orientada al sur, con todos los cerramientos interiores adiabáticos, y un hueco semitransparente en el cerramiento exterior. El muro tiene unas dimensiones de 12 m<sup>2</sup>, con 2 m<sup>2</sup> de hueco semitransparente, y un volumen interior de 36 m<sup>3</sup>. Todos estos valores geométricos pueden ser modificados en el programa en todo momento. Se ha representado este cubículo en la figura 10.6.

Las pérdidas y ganancias por unidad de superficie de muro exterior que se han considerado para el balance del interior de este cubículo son las siguientes:

- Transferencia de calor a través del muro: el calor transferido a través del muro se traslada

<sup>2</sup>Por estrategia de acondicionamiento se entienden las consignas de puesta en marcha y parada del sistema de calefacción y refrigeración, calendario y horario de los mismos, o si estos sistemas presentan limitaciones en su potencia

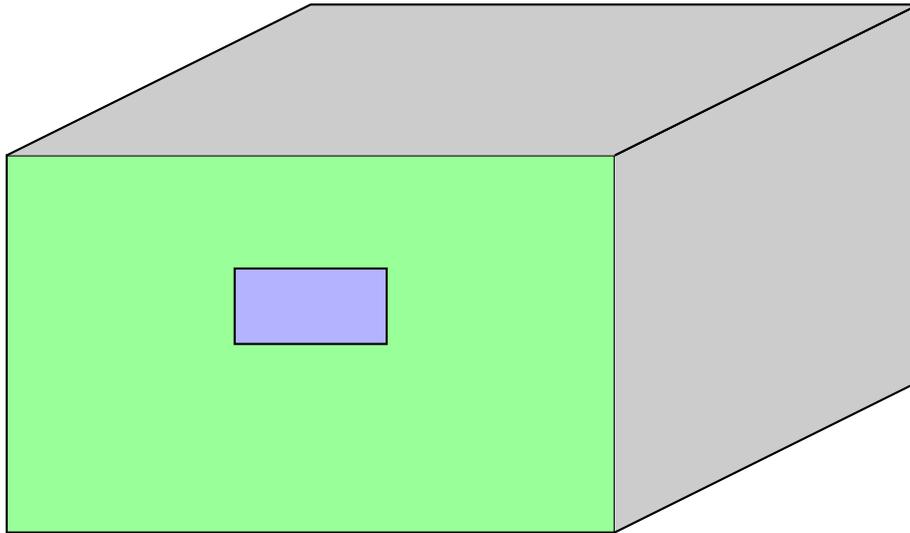


Figura 10.6: Esquema del cubículo simulado

al aire interior mediante convección en la superficie interior del muro

$$q_{muro} = \frac{T_{si}^t - T_{int}^t}{R_t} \quad (10.11)$$

siendo  $T_{si}$  la temperatura de la superficie interior del cerramiento, y  $T_{int}$  la temperatura del aire interior. No se considera la transferencia de calor a través de la ventana.

- Radiación: a través del hueco se transmite la radiación solar del exterior, que es absorbida a los materiales del interior del cubículo. Esta radiación es posteriormente transferida al aire interior, con cierto desfase en el tiempo. El flujo de calor por radiación se calcula como:

$$q_{rad} = 0.2\alpha \cdot I \quad (10.12)$$

siendo  $\alpha$  la absorptividad del espacio interior, y el valor de 0.2 se refiere al ratio entre la superficie opaca y la superficie del hueco. Hay que tener en cuenta que el balance de energía se va a realizar respecto a la superficie total del cerramiento opaco, y la superficie del hueco corresponde al 20 % de dicha superficie<sup>3</sup>. Para el valor de la absorptividad, se ha usado el valor dado por el documento "Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios" del Ministerio de Industria, Energía y Turismo [204]. Según dicho documento, el valor de la absorptividad del conjunto de elementos y superficies interiores es de 0.6.

La cantidad de energía transferida al aire interior, será igual a la irradiancia que atraviesa el hueco vertical del muro y es absorbida por los elementos del interior del cubículo, pero modificada para acompañar el desfase y atenuación que se da normalmente entre la

<sup>3</sup>El cálculo de la transferencia de calor a través del cerramiento opaco, se ha realizado en base a la superficie total de muro opaco. Teniendo en cuenta que la superficie total del cerramiento es de 12 m<sup>2</sup>, y el hueco es de 2 m<sup>2</sup>, la superficie de muro opaco es de 10 m<sup>2</sup>, y el hueco supone el 20 % de dicha cantidad

radiación absorbida y su transferencia al aire. Para conseguir ese efecto, se ha utilizada una media móvil anterior sobre los valores de las dos horas anteriores, obteniendo así el doble efecto de desfase y atenuación, y manteniendo al mismo tiempo la energía total absorbida en el interior. El cálculo que relaciona ambas magnitudes se representa en la ecuación 10.13, siendo en este caso la variable temporal  $t$  la hora para la que se realiza el cálculo.

$$q_{abs}^t = \frac{\sum_{k=0}^2 q_{rad}^{t-k}}{3} \tag{10.13}$$

En la figura 10.7 se representan de forma conjunta la irradiación que atraviesa dicha ventana, y la energía transmitida al aire, durante tres días consecutivos.

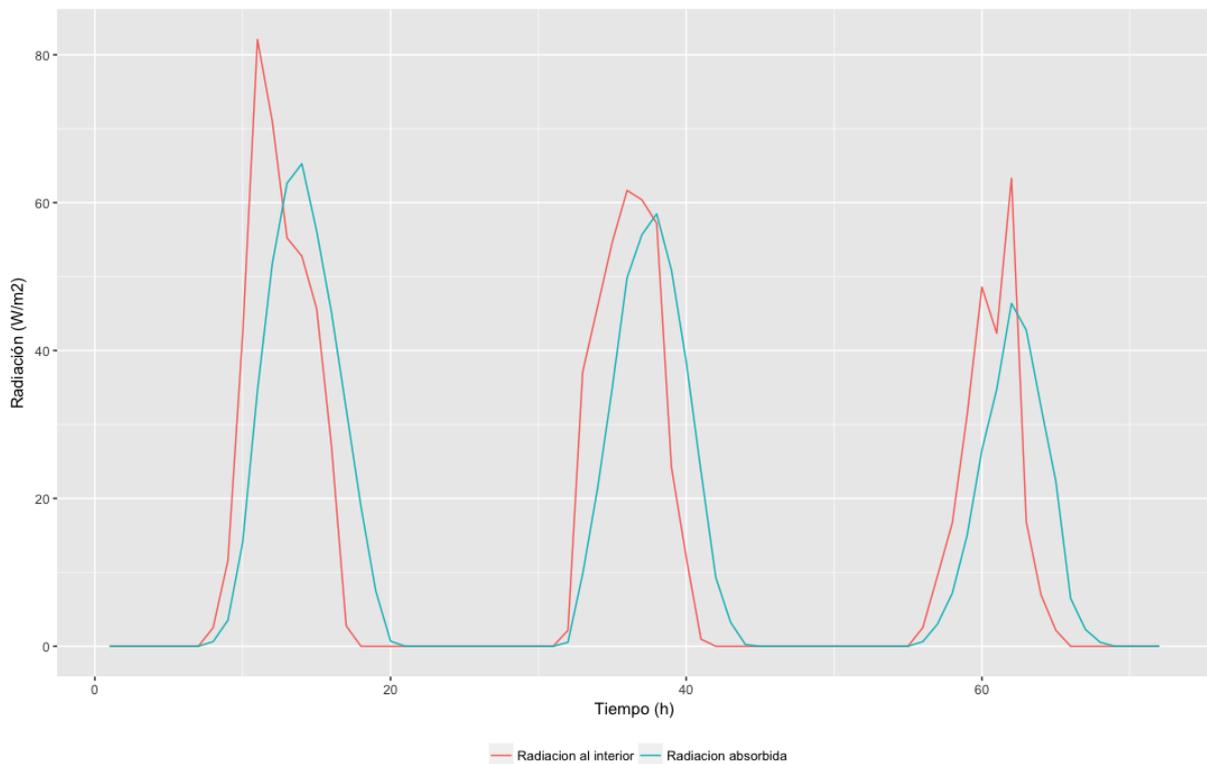


Figura 10.7: Irradiación entrante en el cubículo y energía transmitida al aire

En el caso de estudio no se ha considerado la existencia de cargas internas adicionales, como ocupación de personas, electrodomésticos, o sistemas de iluminación. Caso de querer añadir cargas adicionales, como perfiles de ocupación o de uso de iluminación y electrodomésticos, se podrían añadir directamente junto a la radiación.

- Ventilación e infiltración: el planteamiento del muro sobre el que se quiere intervenir pertenece a una vivienda antigua, que por lo tanto carecerá de ventilación continua. Se simula únicamente la infiltración continua, con un valor de 1.5 renovaciones/hora. Se definen por lo tanto las pérdidas de calor por infiltración mediante la ecuación:

$$q_{infil} = L\rho c_p (T_{int}^t - T_{ext}^t) \tag{10.14}$$



siendo  $L$  la profundidad del espacio interior.

- **Acondicionamiento:** se permite la fluctuación libre de la temperatura interior siempre que no supere unos valores límite, que varían en función de la época del año. En caso de que se superen esos valores, se mantiene la temperatura constante en ese valor, y se calcula la energía necesaria para mantener la temperatura dentro de los límites. Esta energía sería la consumida en un sistema de calefacción o refrigeración. Los valores de temperatura límite se han definido de la siguiente manera:
  - **Invierno:** la temporada de invierno se ha fijado entre el 1 de noviembre y el 10 de mayo. En esta temporada, se activará la calefacción cuando la temperatura baje de 20 °C durante el día, y de 17 °C durante la noche, fijando el periodo nocturno entre las 23h y las 7h. El calor aportado en el sistema de calefacción se considera positivo.
  - **Verano:** durante la temporada de verano, que cubre el resto del año, se activará el sistema de refrigeración cuando la temperatura interior supere 25°C, considerándose la energía aportada por el sistema de refrigeración como negativo.

Los periodos de verano e invierno se han fijado analizando distintas simulaciones, y definiendo el periodo en el que empiezan a ser necesarios la refrigeración y la calefacción.

Con estos elementos definidos, se puede escribir definitivamente la ecuación de balance de energía en el interior del cubículo:

$$\rho_{cub} c_p L \frac{T_{int}^{t+1} - T_{int}^t}{\Delta t} = q_{muro} + q_{rad} - q_{infil} + q_{acond} \quad (10.15)$$

Parte de la energía absorbida o cedida en el interior del cubículo no se destina únicamente a calentar o enfriar el aire interno, sino también a los distintos elementos que habitualmente hay en el interior de la habitaciones. Según el documento "Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios" del Ministerio de Industria, Energía y Turismo [204], los elementos de los espacios interiores suelen tener un calor específico medio de 1200 J/kgK, y un peso medio de 45 kg/m<sup>2</sup>. Usando estos valores, se obtiene una densidad media equivalente del espacio interior  $\rho_{cub}$  de 22.65 kg/m<sup>3</sup>, para un calor específico igual al del aire.

#### 10.2.4. Condiciones de contorno exterior

El sistema que se va a simular está conformado por un cubículo, con una pared exterior orientada al sur, configurada por materiales convencionales y una capa de material de cambio de fase, tal y como se representa en la figura 10.6. Esto supone que este muro orientado se encuentra bajo los efectos del intercambio de calor por convección con el aire exterior, la radiación directa del sol, y el intercambio radiativo de onda larga al entorno y el cielo.

Sin embargo, como condición de contorno exterior, se ha considerado en exclusiva la convección. Para poder incluir el resto de mecanismos de transferencia de calor en esta condición de contorno, como temperatura exterior para la condición de superficie, se va a usar una temperatura modificada, conocida como temperatura sol-aire. Esta temperatura incluye además del intercambio convectivo, los efectos de la radiación solar y de la radiación de onda larga con el entorno.

Para calcular la temperatura sol-aire se ha empleado la siguiente expresión:

$$T_{sol-aire} = T_{ext} + \frac{\alpha I - \Delta Q_{ir}}{h_{ext}} \quad (10.16)$$

siendo  $\Delta Q_{ir}$  la radiación infrarroja adicional para el intercambio de onda larga con el cielo. Como valor de la absorptividad  $\alpha$  se ha utilizado el valor de 0.6, tal y como se recoge en el documento "Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios" del Ministerio de Industria, Energía y Turismo [204]. Para el valor del coeficiente de convección exterior se ha utilizado el valor que da la norma UNE-EN ISO 6946, que supone un valor  $h_{ext}=25 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Para el cálculo de la radiación infrarroja adicional, se ha empleado la siguiente expresión:

$$\Delta Q_{ir} = F_r \cdot h_r (T_{ext} - T_{cielo}) \quad (10.17)$$

El valor del factor de forma,  $F_r$  es de 0.5, puesto que al ser un muro vertical sólo ve la mitad de la bóveda celeste, siguiendo lo establecido por la norma UN-EN ISO 13790. Por su parte, el coeficiente de transmisión de calor superficial por radiación  $h_r$ , siendo este un parámetro dependiente de las temperaturas de muro y del cielo, y variando por lo tanto a lo largo del año, se ha optado por un valor medio<sup>4</sup> de  $6 \text{ W/m}^2\text{K}$ . En la figura 10.8 se representan la temperatura exterior y la temperatura sol-aire para tres días consecutivos.

Se han aplicado estas ecuaciones sobre los datos climáticos de un año tipo para la ciudad de Vitoria-Gasteiz, facilitados por el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. De esa forma se han obtenido todos los datos de condiciones exteriores que requiere el programa para la simulación, a saber, la temperatura sol-aire para el balance de transferencia de energía en la superficie exterior, la temperatura del aire exterior para la infiltración de aire en el cubículo, y la radiación vertical para el cálculo de la ganancia interior por radiación.

## 10.2.5. Entrada y salida de datos

El objetivo de este algoritmo de simulación es obtener información adicional sobre el comportamiento de los materiales de cambio de fase, en función de sus propiedades termofísicas. Esto va a requerir por lo tanto de la realización de múltiples simulaciones, para conseguir un mayor comportamiento de la manera en la que influyen dichas propiedades en el comporta-

<sup>4</sup>Este valor se ha definido realizando una primera simulación sobre un muro convencional, para obtener las temperaturas de superficie exterior, y a partir de las temperaturas medias se ha estimado dicho coeficiente

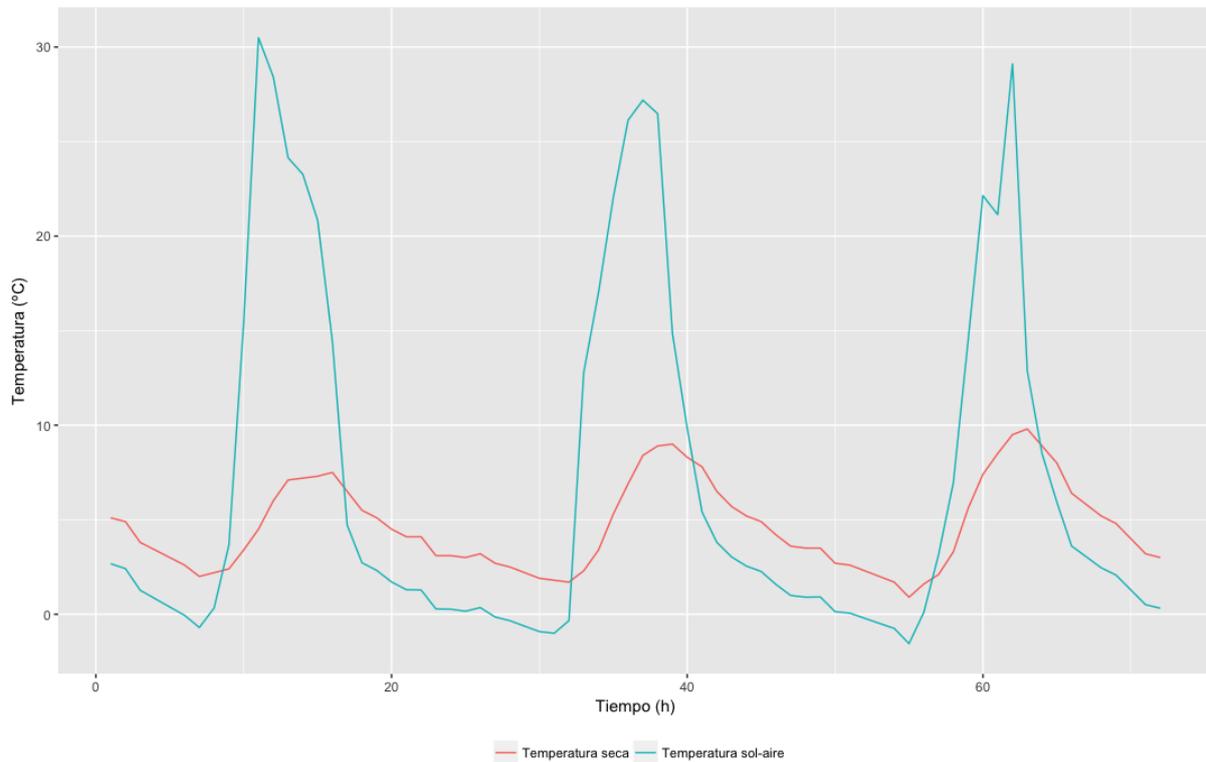


Figura 10.8: Temperatura exterior y temperatura sol-aire

miento térmico de los muros compuestos.

Con la idea de facilitar la realización de dichas simulaciones, se ha diseñado el programa de manera que se puedan cargar múltiples configuraciones desde un archivo de datos, y el programa vaya simulando cada situación de manera secuencial, dando a la salida un archivo con las temperaturas de cada nodo, potencia de acondicionamiento, y flujos de calor exterior e interior para cada configuración de muro.

Este programa se ha implementado mediante el lenguaje de programación Fortran 90.

## Capítulo 11

# Análisis de parámetros del PCM

---

<b>11.1. Consideraciones iniciales</b> . . . . .	<b>186</b>
11.1.1. Definición de los muros a analizar . . . . .	186
11.1.2. Propiedades a considerar en el PCM . . . . .	187
11.1.3. Parámetros de caracterización del muro . . . . .	188
<b>11.2. Análisis de propiedades de PCM</b> . . . . .	<b>190</b>
11.2.1. Diseño de experimentos . . . . .	190
11.2.2. Resultados preliminares del diseño de experimentos . . . . .	193
11.2.3. Análisis de las superficies de respuesta . . . . .	198
<b>11.3. Conclusiones</b> . . . . .	<b>290</b>

---



En los capítulos anteriores se han analizado y validado distintos métodos de cálculo para el comportamiento térmico de PCMs en cerramientos, y se ha planteado un algoritmo para calcular el comportamiento de un muro completo. En el presente capítulo se plantea emplear dicho algoritmo para analizar las propiedades óptimas que un material de cambio de fase debería poseer. Se describen a continuación los planteamientos iniciales, el diseño de experimentos planteado, y las conclusiones del análisis.

## 11.1. Consideraciones iniciales

El planteamiento inicial es comparar soluciones de rehabilitación habituales en muros exteriores, mediante adición de aislamiento, y la alternativa de adición de materiales de cambio de fase al cerramiento. Se va a simular el comportamiento de distintos muros para las condiciones climáticas de Vitoria-Gasteiz. Se ha decidido optar por esta localidad, por la mayor variación de temperaturas a lo largo del año que presenta. De esta forma, se puede comprobar el comportamiento del muro tanto en régimen de calefacción, como en régimen de refrigeración.

El muro base sobre el que proponer opciones habituales de rehabilitación, y la posibilidad de incorporar PCMs como solución alternativa de mejora del comportamiento térmico de los cerramientos, se describe en el apartado 11.1.1.

Para realizar las comparativas, se van a simular distintas configuraciones de los cerramientos empleando el método expuesto de diferencias finitas, con el algoritmo desarrollado en el capítulo 10. Este método, tal y como se comprobó en el capítulo 7 presenta un buen ajuste respecto a los resultados experimentales del ensayo en conductímetro, pero evidentemente presenta cierta desviación, que se ha considerado como aceptable. Aun así, los resultados obtenidos de las simulaciones se van a tener en cuenta en cuanto a las tendencias que apuntan, y serán aproximados en cuanto a los valores obtenidos tanto de demanda de energía, como de valores óptimos de las variables. Los resultados y tendencias servirán en su caso para realizar experimentos más concluyentes en trabajos futuros.

### 11.1.1. Definición de los muros a analizar

El muro base sobre el que analizar la eficacia de las medidas de rehabilitación va a ser un muro de doble hoja con cámara de aire intermedia, sin ningún tipo de aislamiento adicional. Se trata de una tipología de muro bastante habitual en las edificaciones de mediados del siglo XX en España, y que todavía está muy presente en muchos de los edificios existentes. La configuración de este muro base en cuanto a dimensiones y propiedades es la representada en la tabla 11.1, ordenados de exterior a interior.

Para la cámara de aire se ha supuesto una resistencia térmica de  $0.16 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Las opciones de rehabilitación habitual que se van a considerar como comparativa son las siguientes:

- Aislamiento por el exterior: los sistemas de aislamiento térmico por el exterior, también

Material	Esp (mm)	Cond (W/m·K)	Dens (kg/m <sup>3</sup> )	Calor esp (J/kgK)
Ladrillo	80	0.512	920	1050
Cám aire	20	-	-	-
Ladrillo	45	0.667	1000	1050

Tabla 11.1: Materiales utilizados en el muro base

conocidos como SATE, están siendo cada vez una alternativa más habitual, al conseguir un buen aislamiento del cerramiento, sin ocupar espacio por el interior de la vivienda. Se ha planteado simular un SATE de 30 mm de XPS, con una conductividad de 0.035 W/m·K, densidad de 33 kg/m<sup>3</sup> y calor específico de 1450 J/kgK

- Aislamiento de la cámara de aire: otra opción habitual de rehabilitación es la inyección de un aislamiento en la cámara de aire. En este caso se plantea inyectar espuma de poliuretano rellenando toda la cámara de aire, y por lo tanto con un espesor de 20 mm, conductividad de 0.035 W/m·K, densidad de 50 kg/m<sup>3</sup> y calor específico de 1674 J/kgK
- Aislamiento por el interior: la tercera de las opciones de rehabilitación planteadas es la adición de aislamiento por el interior, con las mismas condiciones que el sistema por el exterior recién descrito

Estas configuraciones se van a usar como base de comparación para los muros con inclusión de PCMs, y se va a denominar Lote 0.

Con respecto a las opciones de adición de PCM, se plantean dos opciones distintas, la adición de una capa con inclusión de materiales de cambio de fase por el exterior o por el interior, siguiendo el mismo ejemplo que las opciones de aislamiento en rehabilitación habituales. No se contempla en este caso la opción de añadir PCM en la cámara de aire, porque hasta la fecha no se han desarrollado sistemas de inyección de PCM similares a los que se utilizan para la inyección de materiales aislantes en dichas cámaras.

Los muros con el material de cambio de fase por el exterior se van a denominar Lote 1, mientras que los muros con el material de cambio de fase por el interior, se van a denominar Lote 2.

### 11.1.2. Propiedades a considerar en el PCM

El objetivo es analizar la influencia que tienen las distintas propiedades termofísicas de los materiales de cambio de fase en un cerramiento, para optimizar el ahorro de energía. Tal y como se ha observado en el análisis bibliográfico del apartado 2.7, uno de los factores más importante parece ser la temperatura de cambio de fase, junto con la amplitud del intervalo de cambio de fase.

Otros factores como la capacidad volumétrica de almacenamiento de energía, basada en el calor específico, calor latente, espesor y densidad del material, pueden tener también una influencia notable, al limitar el máximo de energía que se puede acumular en el material.



Finalmente, la conductividad parece ser un elemento de menor, tal y como deducen Stovall y Tomlinson [202], pero a pesar de ello se ha decidido incluir en el análisis de propiedades.

Tanto Stovall y Tomlinson [202], como Neeper [203], señalan la importancia del coeficiente de transmisión de calor superficial en la capacidad de almacenamiento de calor de los materiales de cambio de fase. A pesar de la influencia que parece presentar este parámetro, se trata de una condición de contorno, y no de una propiedad termofísica, por lo que no se va a incluir en la comparativa. Se ha decidido por lo tanto emplear los valores normalizados, de 25 W/m<sup>2</sup>·K para el exterior, y 7 W/m<sup>2</sup>·K por el interior. De esta forma, al emplear el mismo valor en todas las simulaciones, y eliminar así la dependencia con el coeficiente de transmisión de calor en las comparativas.

De esta forma, se tienen que analizar ocho propiedades diferentes, puesto que en el algoritmo de cálculo se puede incluir diferentes valores de conductividad para el estado sólido y el líquido. Se ha revisado la bibliografía para definir los valores habituales de variación de estas propiedades en los materiales de cambio de fase disponibles, obteniéndose los valores de la tabla 11.2<sup>1</sup>. No se ha incluido la temperatura media del cambio de fase, por el gran rango de valores existentes. Existen materiales con materiales de cambio de fase en todo el rango de temperaturas entre -100 °C y 1000 °C. Tampoco se refleja el espesor en la tabla puesto que no es un valor que dependa del tipo de material.

Propiedad	Mínimo	Media	Máximo
$\Delta T$ cambio de fase (°C)	0	5	30
Calor latente (kJ/kg)	86	186	300
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	774	1343	2075
Calor específico (kJ/kg·°C)	1	2.05	3.2
Conductividad sól. (W/m·K)	0.21	0.55	1.09
Conductividad liq. (W/m·K)	0.15	0.29	0.56

Tabla 11.2: Valores habituales de las propiedades de materiales de cambio de fase

### 11.1.3. Parámetros de caracterización del muro

Existen muchos criterios que se podrían emplear para valorar la idoneidad de un material de cambio de fase: capacidad de almacenamiento, velocidad de carga o descarga del material, reducción del consumo energético, capacidad de absorción de la radiación solar, etc. La motivación de analizar las propiedades óptimas de los materiales de cambio de fase, tal y como se ha explicado al inicio, es reducir el consumo de energía en el sector de la edificación, mediante la adición de PCMs a los cerramientos de edificios. Por este motivo, el análisis se va a centrar en la mejora de los parámetros que hacen referencia directa al consumo de acondicionamiento del interior del cubículo, tanto en calefacción como en refrigeración.

<sup>1</sup>Las propiedades que figuran en esta tabla se refieren a los PCM con temperatura de cambio de fase entre 18°C y 50°C

El análisis del consumo de acondicionamiento es sencillo, debido a la manera en la que se ha planteado el método de cálculo. Como se expuso en el apartado 10.2.3, para cada instante temporal se tiene el valor de la energía necesaria para mantener el ambiente interno dentro de los rangos de confort definidos. De esta forma, para obtener la cantidad de energía necesaria a lo largo del año para acondicionar el edificio, es suficiente con integrar esos valores a lo largo del tiempo, para el año completo calculado. Teniendo en cuenta que el método de cálculo calcula el consumo de calefacción como un valor positivo, y el consumo de refrigeración como un valor negativo, la integración se va a hacer tomando los valores absolutos, para que no se eliminen entre sí. Se va a analizar también el consumo de calefacción y de refrigeración por separado.

Además de considerar el total del consumo de energía en el acondicionamiento del interior, se va a considerar también la calidad de dicha energía, mediante el cálculo del contenido exergético de la misma. Para ello, se calcula la exergía total intercambiada de la forma:

$$B_{HVAC} = \sum q_{acond} \left( 1 - \frac{T_{ext}}{T_{int}} \right) \Delta t \quad (11.1)$$

Así, además de analizar la demanda total de energía del edificio, se añade la información de la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior del edificio, mediante el cálculo de la exergía, incluyendo así el sobreesfuerzo que supone acondicionar el espacio interior cuando las temperaturas exteriores son más extremas. Al analizar la demanda de energía de manera cualitativa, buscando minimizar la exergía, permite mejorar la eficiencia de los edificios al permitir el uso de calores de menor calidad, como los relacionados con las energías renovables, y las energías residuales. Además, al estar la exergía relacionada con la temperatura del ambiente exterior, que define la temperatura del foco frío, la optimización en función de la exergía permite una mejor adecuación a las condiciones climáticas de contorno.

Para analizar las pérdidas de calor a través del cerramiento, se va a utilizar también una aproximación basada en la exergía, siguiendo el trabajo de Flores [205], y los razonamientos recién explicados. La manera más habitual de definir el comportamiento térmico de un cerramiento es a través de la resistencia térmica o de la transmitancia. La transmitancia térmica se puede obtener como El valor medio del flujo de calor respecto al valor medio de la diferencia de temperaturas, integrados a lo largo de un intervalo temporal suficientemente largo:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^N q_{int}^j}{\sum_{j=1}^N (T_{int}^j - T_{ext}^j)} \quad (11.2)$$

Extrapolando este concepto al análisis exergético, se puede definir una transmitancia exergética de la siguiente manera:

$$U^{ex} = \frac{\sum_{j=1}^N b_{int}^j}{\sum_{j=1}^N (T_{int}^j - T_{ext}^j)} = \frac{\sum_{j=1}^N q_{int}^j \left( 1 - \frac{T_{ext}^j}{T_{sup,int}^j} \right)}{\sum_{j=1}^N (T_{int}^j - T_{ext}^j)} \quad (11.3)$$



La transmitancia exergética así definida será el último de los parámetros que se van a emplear para analizar el comportamiento de los cerramientos con material de cambio de fase. Resumiendo, los parámetros empleados serán:

- Demanda total de energía para acondicionamiento
- Demanda de energía en calefacción
- Demanda de energía en refrigeración
- Demanda total de exergía de acondicionamiento
- Transmitancia exergética

## 11.2. Análisis de propiedades de PCM

Se quiere analizar el comportamiento de los materiales de cambio de fase en función de 8 variables diferentes, para analizar su influencia en los 5 parámetros definidos: demanda total de energía de acondicionamiento, calefacción, refrigeración, exergía de acondicionamiento, y transmitancia exergética. Con ocho variables en el análisis, el proceso de estudiar la influencia de cada una de ellas, incluidas sus interacciones, se puede volver bastante complejo. Por ello, es necesario recurrir a un método que permita estudiar de manera analítica todas las influencia e interacciones, de manera ordenada, y estudiar de esta forma si existen valores para los que se optimizan las demandas de energía y exergía.

Teniendo en cuenta la dimensión del sistema que se pretende analizar, se ha propuesto realizar un diseño de experimentos para analizar correctamente cada una de las variables y sus interacciones, y posteriormente emplear el método de las superficies de respuesta para encontrar los puntos óptimos que pudieran existir. A continuación se describe el proceso completo de análisis.

### 11.2.1. Diseño de experimentos

El diseño de experimentos permite aplicar técnicas estadísticas y otras herramientas matemáticas, como la regresión lineal, al estudio de procesos complejos, para determinar de manera analítica la influencia de múltiples factores de forma simultánea. Mediante la aplicación de este tipo de técnicas, se puede analizar no sólo el peso de cada uno de los parámetros de diseño en el resultado final, sino también las interrelaciones que se pueden dar entre cada una de las variables.

#### 11.2.1.1. Consideraciones iniciales

En el caso concreto que se está analizando, se quiere estudiar la influencia de 8 variables diferentes sobre el consumo energético del cubículo. La forma inicial de afrontar este problema, supone realizar diferentes simulaciones para varios valores de cada una de las variables.

Tomando el caso mínimo de dos valores para cada variable, el número de simulaciones a realizar sería de  $2^8=256$  simulaciones para cada uno de los dos lotes a analizar. Este tipo de diseño experimental se denomina diseño factorial completo  $2^k$ , y es capaz de analizar procesos lineales. No es capaz de incluir términos cuadráticos ni analizar la posible curvatura de las variables de respuesta. Para analizar los casos en los que alguna de las variables tiene una influencia cuadrática, es necesario añadir un tercer punto de simulación, con lo que serían necesarias  $3^8=6561$  simulaciones por lote, configurando así un diseño factorial completo  $3^k$ .

En el proceso que vamos a analizar, no se conoce a priori si la relación entre las variables y los parámetros de salida definidos va a ser puramente lineal, o es necesario incluir elementos cruzados y cuadráticos. Es posible ajustar cualquier superficie por tramos lineales, pero eso siempre supone una falta de ajuste, que puede ser importante en la zonas de mayor curvatura. De todos modos, realizar las más de 6000 simulaciones por lote que supone afrontar un diseño  $3^k$  completo resulta inabarcable a priori. Por ello se va a plantear un enfoque diferente, complementando el diseño  $2^k$  con un diseño central compuesto, y usando diseños factoriales fraccionados.

El diseño central compuesto supone añadir corridas axiales para cada una de las variables, manteniendo el resto de variables en su valor medio. Lo habitual en un diseño  $2^k$  es calcular la respuesta del sistema para unos valores por encima y por debajo del valor medio de dicha variable, denotados normalmente como +1 y -1 respectivamente<sup>2</sup>. A estos valores se les añade una corrida para el valor central, con los valores medios de cada variable  $(0,0,\dots,0)$ , y dos corridas adicionales para cada variable, a una distancia  $\alpha$  del valor central, siendo así los elementos a añadir  $(+\alpha,0,\dots,0)$ ,  $(-\alpha,0,\dots,0)$ ,  $(0,+\alpha,\dots,0)$ ,  $(0,-\alpha,\dots,0)$  y así sucesivamente. Se ha representado este diseño en la figura 11.1 para el caso de un diseño con tres variables. Este sistema permite reducir el número total de simulaciones de las 6561 que requiere el diseño  $3^8$ , a 273 simulaciones que requiere el diseño central compuesto (256 del diseño  $2^8$ , más 17 de las corridas axiales y la central).

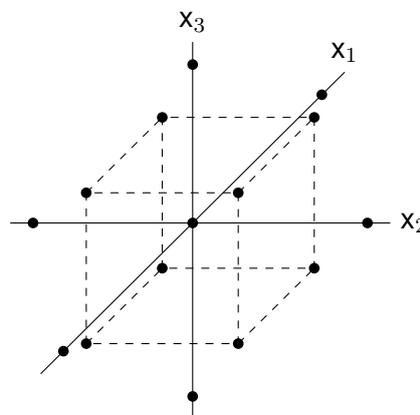


Figura 11.1: Diseño central compuesto para tres variables

<sup>2</sup>De hecho, se codifican los valores de cada variable para que el valor codificado coincida con  $\pm 1$ , y así se elimine la importancia del valor absoluto de cada una de ellas



De todos modos, debido al gran número de factores a analizar, la cantidad de simulaciones a realizar sigue siendo excesiva. Hay que tener en cuenta que el número total de simulaciones es el doble de las expuestas, puesto que hay que realizarlas para cada uno de los dos lotes, con el material de cambio de fase por el exterior, y con el material de cambio de fase por el interior. Analizando el número de simulaciones, para el diseño factorial completo  $2^8$ , de los 255 grados de libertad del diseño<sup>3</sup>, tan sólo 8 corresponden con los efectos principales, las variables a analizar, otras 8 a los términos cuadráticos de las variables y 28 a las relaciones entre dos variables. El resto de términos corresponde a las interrelaciones entre tres variables o más. Estas interrelaciones de orden superior suelen ser insignificantes, lo que permite hacer un diseño fraccionado [206].

Los diseños factoriales fraccionados se basan en reducir el tamaño del diseño, bloqueando y agregando entre sí los efectos de menor peso a los efectos principales. Así, por ejemplo, para el caso de ocho variables que se está analizando, si estas variables se denominan de manera secuencial como A, B, C,... hasta H, si se igualan el efecto de la variable principal G, con la interrelación de cuatro variables ABCD, y H con ABEF, se tiene un diseño que es una cuarta parte del diseño completo, que se puede realizar en tan sólo 64 simulaciones. A este tipo de diseño se le denominaría diseño factorial fraccionado  $2^{8-2}$ , ya que se han usado dos variables principales para reducir la cantidad de elementos a analizar. Como contrapartida, este tipo de diseño suma interrelaciones entre sí. Por ejemplo, además de las ya mencionadas para las variables G y H, agrega la interrelación de dos variables AB, con las de tres variables CDG y EFH.

Este tipo de diseños fraccionados, además de reducir el número de simulaciones, presenta ventajas adicionales. Permite analizar qué variables presentan menor influencia en el resultado final, y descartarlas. Al hacer estos descartes, se pueden proyectar los resultados ya obtenidos en diseños más robustos, dependientes de menos variables. Y caso de ser necesario agregar más información, es sencillo aumentar el número de datos mediante la realización de más fracciones del mismo diseño fraccional. Por ejemplo, y siguiendo con el caso del diseño fraccionado  $2^{8-2}$ , este se puede reconvertir en un diseño menor en caso de que alguna de las variables presente una influencia menor, proyectándose a un diseño  $2^{7-1}$ , o incluso un diseño completo  $2^6$ , o se puede completar con otro diseño fraccionado  $2^{8-2}$  complementario, para obtener un diseño  $2^{8-1}$  más robusto.

### 11.2.1.2. Elección del Diseño de Experimentos

Se plantea emplear un diseño de experimentos factorial fraccionado, complementado con un diseño central compuesto, para analizar la influencia de la curvatura. Para analizar las distintas posibilidades y diseñar el experimento en sí, se van a emplear las herramientas del paquete `rsm` en R, que provee de un potente conjunto de aplicaciones para diseñar experimentos, realizar su análisis estadístico, encontrar puntos óptimos, y representarlos gráficamente.

<sup>3</sup>Los grados de libertad corresponde con el número de simulaciones a realizar, menos una

En la tabla 11.3, se representan los posibles diseños que se podrían emplear. Las columnas  $\alpha$  rot y  $\alpha$  ort hacen referencia a los valores que hay que dar a la posición  $\alpha$  de las corridas axiales, para que el diseño sea rotatable u ortogonal respectivamente. Cuando el valor es el mismo en las dos columnas, el diseño será al mismo tiempo rotatable y ortogonal para ese valor.

	Factorial	Central	Simulaciones	$\alpha$ rot	$\alpha$ ort
1	$2^{8-4}$	1	85	2.828	2.828
2	$2^{8-3}$	1	146	3.364	2.904
3	$2^{8-2}$	1	274	4.000	2.910

Tabla 11.3: Diseños experimentales disponibles

La rotabilidad hace referencia a la varianza de predicción que presenta el diseño en todas las direcciones. Un diseño rotatable, presenta una varianza consistente y estable en todas las direcciones, y por lo tanto una precisión en la estimación independiente de la dirección. Por su parte, la ortogonalidad es una propiedad que reduce la varianza de los coeficientes de regresión. Resulta por lo tanto interesante que el diseño planteado sea lo más rotatable y ortogonal posible. El diseño 1 cumple con esta condición, mientras que para el resto de diseños los valores para la rotabilidad y la ortogonalidad son demasiado dispares.

Se decide por lo tanto optar inicialmente por el diseño 1, que presenta al mismo tiempo el menor número de simulaciones a realizar, y se trata de un diseño rotatable y ortogonal. Se trata de un diseño de Resolución V, lo que significa que los efectos principales y las interacciones entre dos de ellos son independientes entre sí, pero están mezcladas con las interacciones de tres o más factores. El diseño del experimento completo, se presenta en el apéndice B, en la tabla B.1, junto con las ecuaciones para codificar las variables. Se presentan también los valores reales de las variables, en la tabla B.2 para el lote 1, y en la tabla B.3 para el lote 2.

### 11.2.2. Resultados preliminares del diseño de experimentos

Con los valores definidos a través del diseño de experimentos, se han simulado los muros del lote 1 y lote 2, además de los muros sin PCM del lote 0 presentados en la sección 11.1.1. Esto ha supuesto la realización de un total de 174 simulaciones, con las que se han obtenido los valores de los 5 parámetros previamente definidos. Todos los resultados de las simulaciones se presentan de nuevo en el apéndice B, en la tabla B.5 para el lote 0, la tabla B.6 para el lote 1, y la tabla B.7 para el lote 2. Se van a analizar a continuación los resultados para cada uno de los parámetros.

#### 11.2.2.1. Energía de acondicionamiento

En la figura 11.2 se representan los diagramas de caja de la demanda total de energía para acondicionar el cubículo, tanto en calefacción como en refrigeración.

El lote 2, con el PCM situado por el interior, presenta en general mejores resultados que el

## Energía de acondicionamiento

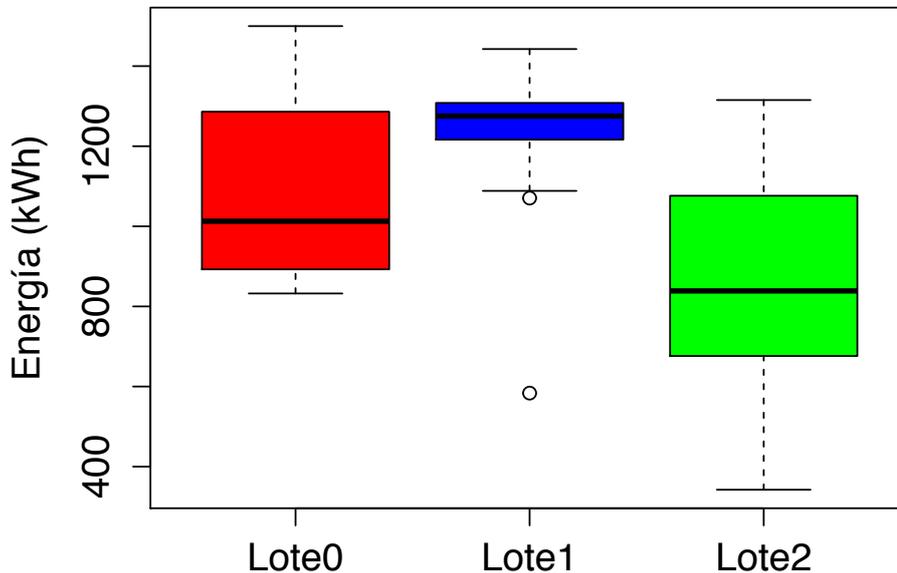


Figura 11.2: Diagrama de caja para la energía de acondicionamiento

resto de configuraciones. La propia mediana de los resultados de simulación se encuentra por debajo de los valores del resto del lotes.

El lote 2, con el PCM por el exterior, presenta por el contrario un comportamiento notablemente peor, con un mayor consumo de energía en el mismo rango que los muros sin PCM. Esta configuración presenta una menor variabilidad que el resto, pero existen varios valores atípicos que deben ser analizados con mayor detenimiento, puesto que presentan valores muy inferiores al resto.

El valor menor del lote 2, corresponde con la simulación 80, con una demanda de energía de 583.544 kWh. Se trata de una de las corridas axiales del diseño central compuesto, en concreto para un valor de conductividad de PCM sólido de 0.017 W/m·K. Esta conductividad es excesivamente baja, con lo que el ahorro de energía debe precisamente al gran aislamiento generado en esta simulación.

### 11.2.2.2. Demanda de calefacción

Para el caso de la demanda de calefacción, se ha tomado en exclusiva las situaciones en las que es necesario aportar energía en el cubículo, para mantener su temperatura interior por encima de los límites marcados. En la figura 11.3 se representa el diagrama de caja de los resultados de las simulaciones.

## Demanda de calefacción

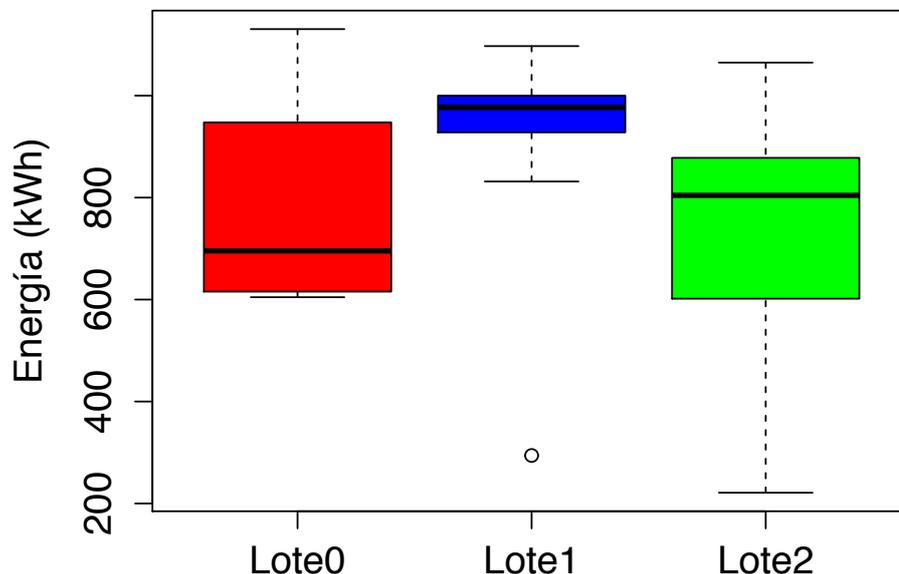


Figura 11.3: Diagrama de caja para la demanda de calefacción

Para la demanda de calefacción, el lote 2 no presenta una diferencia tan notable respecto al resto de lotes. Sólo el cuartil inferior presenta un comportamiento mejor que el resto de configuraciones. Nuevamente, el valor atípico que presenta el lote 1, se corresponde nuevamente con la simulación 80.

### 11.2.2.3. Demanda de refrigeración

Se ha analizado también por separado la demanda de refrigeración del cubículo. Se representa el diagrama de caja de los resultados de las simulaciones en la figura 11.4.

En este caso, la mejora de situar el PCM en el interior es notablemente superior al resto de configuraciones. De hecho, en varias de las simulaciones la demanda energética prácticamente se reduce a cero. En varias de las simulaciones, la demanda anual de refrigeración se sitúa en torno a 5 kWh anuales, mientras que la mediana del resto de configuraciones se sitúa en torno a 300 kWh anuales.

El lote 1 en este caso presenta un comportamiento ligeramente mejor que el lote 0, sin PCM. El valor mínimo del lote 1, que se muestra como valor atípico en el diagrama de caja, se corresponde con una demanda de refrigeración de 215.783 kWh, para la simulación 84. Esta simulación se corresponde con la temperatura menor de cambio de fase simulada, 23.69 °C.

## Demanda de refrigeración

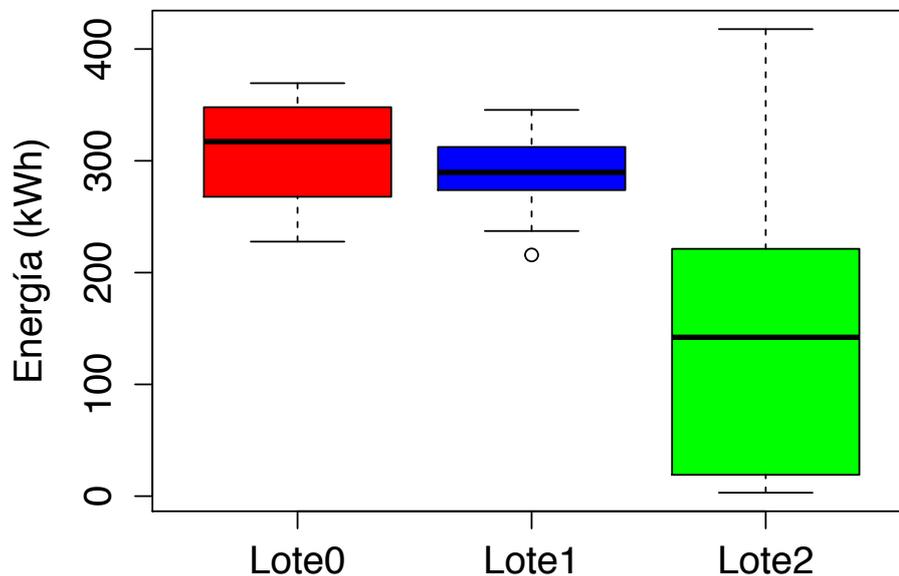


Figura 11.4: Diagrama de caja para la demanda de refrigeración

### 11.2.2.4. Exergía de acondicionamiento

Además de la energía total demandada para el acondicionamiento del cubículo, se ha determinado también el valor exergético total de la misma. Se representa el resultado de las simulaciones en la figura 11.5.

El resultado obtenido es comparativamente similar al de la energía total de acondicionamiento, con las configuraciones con PCM por el interior presentando un mejor comportamiento que el resto, y el PCM por el exterior el peor comportamiento. El valor atípico de nuevo corresponde con el valor mínimo de la conductividad, la simulación 80.

### 11.2.2.5. Transmitancia exergética

Finalmente se ha decidido analizar el comportamiento que presenta la transmitancia exergética en los muros con PCM. Se representa el diagrama de caja de los resultados de las simulaciones en la figura 11.6.

Algunos de los resultados obtenidos son negativos, algo que no debería ocurrir en la transmitancia. La mayoría de los valores negativos son muy cercanos a cero, con lo que puede ser debido al error de cálculo de las simulaciones. La mayor inercia térmica de estos muros también puede ser un motivo de estos valores negativos, debido al mayor desfase entre las diferencias de temperaturas y los flujos de calor.

## Exergía de acondicionamiento

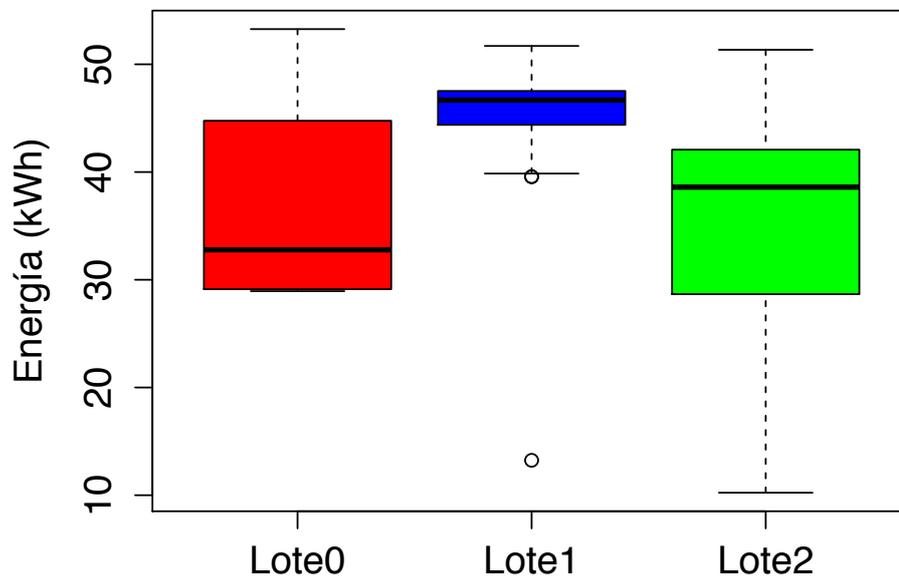


Figura 11.5: Diagrama de caja para la exergía de acondicionamiento

Una vez más, la configuración con PCM por el interior presenta un comportamiento notablemente mejor que el resto de configuraciones.

### 11.2.2.6. Conclusiones iniciales

De los resultados iniciales presentados, parece claro que la configuración con PCM por el interior presenta un mejor comportamiento en todos los parámetros analizados. Esto se puede deber a la mayor capacidad de almacenamiento térmico del PCM. La temperatura del interior del cubículo se mantiene relativamente estable, con lo que el material de cambio de fase se encuentra durante más tiempo en la zona de transición, y su aprovechamiento es mejor. Sin embargo, en el exterior las temperaturas varían en mayor medida, con lo que el material de cambio de fase se encontrará normalmente fuera de la zona de transición, y el aprovechamiento del calor latente será menor.

Aun así, hay que señalar que la elección de las temperaturas de cambio de fase ha sido complicada para el caso del PCM por el exterior. Siguiendo el ejemplo del PCM por el interior, se ha planteado simular en torno a una temperatura de cambio de fase de 35 °C, analizando la evolución de las temperaturas de la superficie exterior del muro en el lote 0, durante las horas de radiación solar, que es cuando incide mayor cantidad de energía sobre el PCM. Es posible que esta elección no sea la más adecuada, pero pretende ser tan sólo un primer acercamiento

## Transmitancia exergética

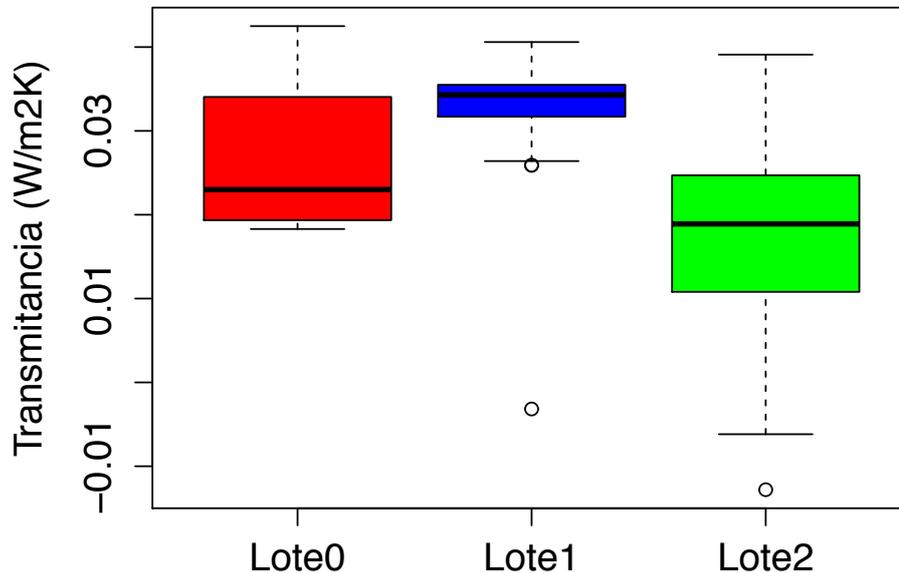


Figura 11.6: Diagrama de caja para la transmitancia exergética

al análisis de las propiedades óptimas que debe presentar un PCM para ser empleado como capa exterior de un cerramiento.

En el siguiente apartado se va a analizar en profundidad la influencia de cada una de las variables en el consumo energético del cubículo.

### 11.2.3. Análisis de las superficies de respuesta

El objetivo de realizar esta batería de simulaciones es doble. Por un lado, analizar la influencia de las distintas variables en el comportamiento térmico de los cerramientos con inclusión de PCMs; y por el otro, analizar si existe alguna combinación de dichas variables que permita un aprovechamiento óptimo de la capa de material de cambio de fase. El análisis que se está realizando se enfoca en exclusiva al análisis de parámetros energéticos, sin entrar en otros enfoques como podría ser la optimización de la cantidad de PCM a emplear, o un análisis económico comparando el ahorro de energía respecto al sobrecoste del PCM.

Este análisis se va a realizar mediante el método de superficies de respuesta. Se trata de un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas para el modelado y análisis de problemas en los que se desea analizar y optimizar un parámetro que depende de varias variables al mismo tiempo. El método se basa en analizar el valor del parámetro para distintos valores de las variables, seleccionados mediante un diseño de experimentos, para posteriormente ajustar

la respuesta a una superficie, que se denomina "superficie de respuesta". El análisis de la forma de esta superficie permitirá encontrar los puntos óptimos en los que los valores del parámetro de análisis se maximiza o minimiza. Para este análisis se ha empleado el diseño de experimentos presentado previamente.

Se va a emplear este método para cada uno de los dos lotes con inclusión de PCM, y para cada uno de los cinco parámetros analizados. Se va a ajustar la superficie de respuesta mediante ecuaciones de primer y segundo orden. La ecuación de segundo orden permite normalmente un mejor ajuste, además del análisis de interrelaciones entre variables, y una primera estimación de la existencia de puntos óptimos. La superficie de primer orden por su parte permite encontrar la dirección de mayor aumento o reducción del valor de los parámetros, de forma que se pueda mover la simulación hacia otros valores en caso de que se observe que el punto óptimo se encuentra fuera de la zona de simulaciones inicial.

### 11.2.3.1. PCM exterior. Energía de acondicionamiento

La energía total de acondicionamiento, o demanda de acondicionamiento, se ha obtenido como la suma de la demanda de calefacción y refrigeración a lo largo del año. Para el diseño de experimentos realizado para el lote 1, con el material de cambio de fase por el exterior. En este lote de simulaciones la demanda de acondicionamiento varía entre un máximo de 1442.6 kWh, y un mínimo de 583.5 kWh. Tal y como se ha demostrado en el diagrama de caja 11.2 de la página 194, exceptuando este valor mínimo, que se trata de un valor atípico, el material de cambio de fase por el exterior presenta un comportamiento peor que el lote 0 que sólo contiene materiales convencionales de aislamiento. El valor mínimo corresponde a la simulación 80, que se ha realizado con los valores de la tabla 11.4. Como se puede observar, esta simulación

ID	$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (J/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)	$k_{liq}$ (W/m·K)
80	5.05	35.00	200000	0.020	1350	1550	0.017	0.350

Tabla 11.4: Propiedades de la simulación 80 del Lote 1

toma los valores centrales de las variables del Lote 1, excepto para la conductividad de estado sólido, para la que presenta un valor mínimo, muy inferior a los aislamientos convencionales. Se puede predecir por lo tanto que en este caso tiene mayor importancia la baja conductividad del material, que la presencia de un cambio de fase.

Se ha aplicado el método de superficies de respuesta a los resultados de la energía total de acondicionamiento para el lote 1, con el PCM por el exterior. La tabla 11.5 representa el resultado del ajuste de primer orden, mientras que en la tabla 11.6 se presenta el resultado del ajuste de segundo orden.

En estas tablas, los valores de la primera columna, "Estimate", son los coeficientes de ajuste para cada una de las variables. Los ajustes están realizados sobre las variables codificadas. La primera de las filas se corresponde con el término independiente, y el resto de filas a cada una de las variables o de las interacciones entre cada par de variables para el ajuste de se-



	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	1252.9472	6.8512	182.88	0.0000
A	-1.3800	7.0620	-0.20	0.8456
B	19.6309	7.0620	2.78	0.0069
C	-3.4547	7.0620	-0.49	0.6261
D	-51.0713	6.9754	-7.32	0.0000
E	-14.8562	7.0620	-2.10	0.0387
F	-17.3444	7.0620	-2.46	0.0163
G	63.8087	7.0620	9.04	0.0000
H	1.5305	7.0620	0.22	0.8290
R <sup>2</sup> múltiple		0.6692		
R <sup>2</sup> ajustado		0.6344		
Estadístico F		19.22 sobre 8 y 76		
Valor p		1.836e-15		

Tabla 11.5: Coeficientes de ajuste para la energía de acondicionamiento del lote 1, de primero orden

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	1289.4242	23.3645	55.19	0.0000
A	-1.3800	5.8426	-0.24	0.8145
B	19.6309	5.8426	3.36	0.0017
C	-3.4547	5.8426	-0.59	0.5577
D	-51.0713	5.7709	-8.85	0.0000
E	-14.8562	5.8426	-2.54	0.0150
F	-17.3444	5.8426	-2.97	0.0050
G	63.8087	5.8426	10.92	0.0000
H	1.5305	5.8426	0.26	0.7947
A:B	0.6629	6.5322	0.10	0.9197
A:C	0.3840	6.5322	0.06	0.9534
A:D	-0.3141	6.5322	-0.05	0.9619
A:E	-0.2213	6.5322	-0.03	0.9731
A:F	0.4883	6.5322	0.07	0.9408
A:G	-0.8344	6.5322	-0.13	0.8990
A:H	-0.1372	6.5322	-0.02	0.9833
B:C	2.5294	6.5322	0.39	0.7007
B:D	0.9362	6.5322	0.14	0.8868
B:E	1.6490	6.5322	0.25	0.8020
B:F	-0.6588	6.5322	-0.10	0.9202
B:G	2.8843	6.5322	0.44	0.6612
B:H	-1.3565	6.5322	-0.21	0.8365
C:D	0.7936	6.5322	0.12	0.9039
C:E	0.5175	6.5322	0.08	0.9373
C:F	-0.0347	6.5322	-0.01	0.9958
C:G	0.3613	6.5322	0.06	0.9562
C:H	0.0083	6.5322	0.00	0.9990
D:E	-2.2929	6.5322	-0.35	0.7274
D:F	-4.3805	6.5322	-0.67	0.5063
D:G	7.9024	6.5322	1.21	0.2335
D:H	-0.3297	6.5322	-0.05	0.9600
E:F	-3.5089	6.5322	-0.54	0.5941
E:G	0.7302	6.5322	0.11	0.9115
E:H	-0.3959	6.5322	-0.06	0.9520
F:G	0.9084	6.5322	0.14	0.8901
F:H	0.1837	6.5322	0.03	0.9777
G:H	-0.3395	6.5322	-0.05	0.9588
A^2	-2.8176	5.2802	-0.53	0.5966
B^2	-3.3808	5.2802	-0.64	0.5256
C^2	1.2830	5.2802	0.24	0.8093
D^2	2.8868	4.7300	0.61	0.5451
E^2	1.4389	5.2802	0.27	0.7866
F^2	0.7007	5.2802	0.13	0.8951
G^2	-39.3553	5.2802	-7.45	0.0000
H^2	0.4153	5.2802	0.08	0.9377
R <sup>2</sup> múltiple		0.8808		
R <sup>2</sup> ajustado		0.7498		
Estadístico F		6.72 sobre 44 y 40		
Valor p		7.209e-09		

Tabla 11.6: Coeficientes de ajuste para la energía de acondicionamiento del lote 1, de segundo orden

gundo orden de la tabla 11.6. Como ejemplo, el ajuste de la tabla 11.5 se correspondería con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 Q_{hvac} = & 1252.95 - 1.38A + 19.63B - 3.45C - 51.07D - 14.86E - \\
 & - 17.34F + 63.81G + 1.53H
 \end{aligned}
 \tag{11.4}$$

Al estar los coeficientes de ajuste realizados sobre las variables codificadas, y tener todas las variables el mismo rango de variación, el valor del coeficiente da también una primera idea de las variables que presentan más influencia, siendo estas las que tengan mayor mayor coeficiente. En el caso del ajuste de primer orden de la tabla 11.5 se puede observar que la conductividad de estado sólido, que se corresponde con la variable G, es la que presenta mayor influencia, seguida por el espesor, variable D.

La segunda columna de estas tablas, "Std. Error", presenta la desviación estandar entre los valores de las simulaciones y los valores predichos por el ajuste. Esta desviación estándar se utiliza para calcular la tercera columna, "t value", que es el valor del estadístico t para la prueba conocida como t de Student. Estas dos columnas no se emplean realmente en el análisis de los ajustes. Finalmente la última columna, con el valor "Pr(>|t|)", mide la probabilidad de que el valor del coeficiente sea nulo. Así, interesa que este valor de probabilidad se alo más bajo posible, siendo admisibles valores por debajo de 0.10, pero siendo deseable que este valor esté por debajo de 0.05. Esta probabilidad se calcula en función de la prueba t de Student.

En la parte baja de cada tabla, aparecen los estadísticos genéricos del modelo completo. El valor  $R^2$  se corresponde con el ratio entre la suma de cuadrados del modelo y la suma de cuadrados total de los datos, y determina la proporción de la variabilidad de datos que explica el modelo. Así, este parámetro mide el grado de ajuste del modelo a los datos de simulación, y es mejor cuanto más cercano a 1 es. El valor  $R^2$  múltiple mide directamente este ratio. Sin embargo, este parámetro suele presentar un comportamiento que indice a error cuando el modelo presenta muchos coeficientes. Al existir gran cantidad de coeficientes, el modelo tiende a ajustarse mejor, pero muchas veces lo hace de manera ficticia, con coeficientes de baja significatividad. El valor  $R^2$  ajustado corrige este comportamiento, haciendo que su valor disminuya cuando se agregan términos innecesarios al modelo [206]. El valor  $R^2$  ajustado permite por lo tanto comparar modelos entre sí, al penalizar la adición de elementos de baja significatividad.

El valor del estadístico  $F$  se emplea para la prueba F de Fisher, que demuestra que las variables analizadas son estadísticamente significativas. Finalmente, el valor  $p$  define el nivel de significación menor que llevaría a rechazar el modelo propuesto [206]. Coincide con el valor  $\text{Pr}(>|t|)$  que se ha explicado previamente para cada uno de los coeficientes, pero en este caso para el modelo completo. Para el estadístico  $F$  interesa que su valor sea lo más alto posible, mientras que para el valor  $p$  este debe ser lo más bajo posible, y siempre inferior a 0.05 para poder aceptar el modelo.

Analizando los estadísticos genéricos de cada modelo, se puede observar que ambos presentan un buen comportamiento, y serían aceptables, presentando el modelo de segundo or-



den mejor ajuste en cuanto a los valores de los coeficientes  $R^2$ , y el estadístico  $F$  y el valor  $p$  dentro de los valores de aceptación. Analizando los coeficientes de ajuste para las variables de cada modelo, los valores de la última columna,  $\Pr(>|t|)$ , presentan para muchas de las variables valores elevados, lo que implicaría que deben ser descartados debido a su baja significatividad, o dicho de otra forma, deben ser tomados como nulos.

En el modelo de primer orden, las variables de mayor significación son la temperatura media de cambio de fase, el espesor, la densidad, el calor específico, y la conductividad en estado sólido (variables B, D, E, F y G). El modelo de segundo orden coincide con este análisis, y añade un término cuadrático para la conductividad de estado sólido.

Respecto a los valores no incluidos en el modelo, la ausencia de la diferencia de temperatura de cambio de fase y el calor latente resulta sorprendente, sobre teniendo en cuenta que el calor latente delimita la cantidad máxima de energía que se puede almacenar en el material. La primera puede ser debido a la manera en que la temperatura varía a lo largo del día. El PCM normalmente pasa por un único ciclo diario de fusión-solidificación, y debido a la radiación directa incidente, el cambio de fase se podría producir a gran velocidad, con lo que la diferencia de temperatura de la transición tiene poco peso en el intercambio total de calor. Respecto al calor latente, resulta extraña su baja influencia en la demanda total de acondicionamiento. Al estar el PCM en el exterior, gran parte del calor absorbido por el material se devuelve directamente al exterior, causando un menor impacto sobre la demanda energética. Finalmente, la conductividad en estado líquido, al tomar valores similares a la de estado sólido, posiblemente queda ligada a los valores de esta última. De todos modos, puede ser debido a que el PCM en el exterior se encuentra gran parte del tiempo en estado sólido, con lo que el peso del estado líquido sería más bien marginal. De todos modos, tal vez una mala selección de los valores iniciales del diseño de experimentos puede ser la causa real de este resultado. Más adelante se analizarán valores adicionales para la temperatura media de cambio de fase, por si fuera necesario reorientar el diseño y obtener valores mejores.

En un primer paso, se decide reajustar el modelo eliminando las variables que carecen de significatividad. El resultado del nuevo ajuste se presenta en la tabla 11.7. El valor  $R^2$  ajustado, así como el estadístico  $F$  y el valor  $p$  presentan un comportamiento notablemente mejor que en los ajustes anteriores.

	Estimate	Std. Error	t value	$\Pr(> t )$
(Intercept)	1290.0792	5.5215	233.65	0.0000
B	19.6309	4.4373	4.42	0.0000
D	-51.0713	4.3829	-11.65	0.0000
E	-14.8562	4.4373	-3.35	0.0013
F	-17.3444	4.4373	-3.91	0.0002
G	63.8087	4.4373	14.38	0.0000
G <sup>2</sup>	-39.4528	3.6738	-10.74	0.0000
R <sup>2</sup> múltiple			0.8660	
R <sup>2</sup> ajustado			0.8557	
Estadístico F			83.99 sobre 6 y 78	
Valor p			< 2.2e-16	

Tabla 11.7: Coeficientes de ajuste de la demanda de acondicionamiento mejorados, lote 1

Tal y como se puede observar, en este modelo mejorado las variables significativas siguen siendo la temperatura media de cambio de fase, el espesor, la densidad, el calor específico, y

la conductividad en estado sólido (variables B, D, E, F y G). La conductividad presenta además un término cuadrático negativo, lo que implicaría la presencia de un máximo en el ajuste del modelo para la conductividad. Además, no se presentan términos cruzados entre variables, con lo que no habría interacciones entre ellas. Tal y como se puede observar en los gráficos, el intervalo de temperaturas (figura 11.7a), el calor latente (figura 11.7c), y la conductividad de estado líquido (figura 11.7h), no presentan una influencia clara sobre la demanda de acondicionamiento, lo que se corresponde con su ausencia del modelo mejorado.

Con respecto al resto de variables, se observa una tendencia a la disminución de la demanda con los valores más bajos de la temperatura media de cambio de fase (figura 11.7b), y conductividad de estado sólido (figura 11.7h), y valores mayores del espesor (figura 11.7d), la densidad (figura 11.7e), calor específico (figura 11.7f).

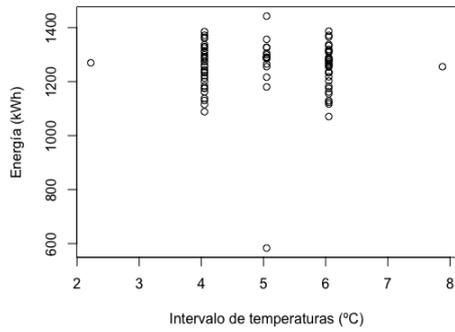
Para observar también la relación entre las variables, se han representado gráficamente de dos en dos, tal y como se puede ver en el conjunto de figuras 11.8. En estos diagramas, los tonos verdes representan un valor menor de la demanda de acondicionamiento, que es el objetivo que se está buscando. Las variables no representadas se han fijado en los valores de la tabla 11.8.

$T_m$ (°C)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)
35	0.02	1350	1550	0.38

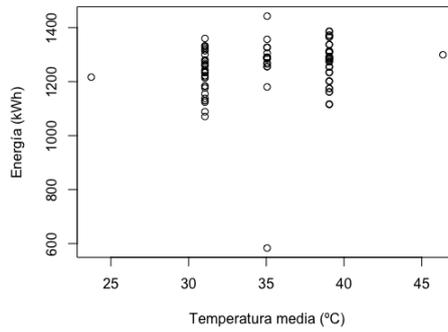
Tabla 11.8: Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.8

Las figuras 11.8a a 11.8d representan la relación de la conductividad de estado sólido con respecto al resto de variables. Esta conductividad es la única que tiene un término cuadrático, y eso se aprecia en la curvatura que presentan las líneas de contorno. Como se puede apreciar, valores bajos de la conductividad consiguen que se reduzca la demanda de acondicionamiento, tal y como se había observado al analizar de manera general los resultados, en la figura 11.3. Aún así, la mayoría de las combinaciones posibles se quedan por encima de los 800 kWh de demanda, que es la mediana de la demanda de acondicionamiento con el PCM por el interior. También se observa en la figura 11.8a que un aumento del espesor consigue una reducción de la demanda para conductividades elevadas. La importancia de conseguir conductividades bajas o espesores elevados para reducir la demanda de energía es un efecto de sobra conocido, y tiene más relación con las propiedades normales de los materiales, que con el uso del calor latente.

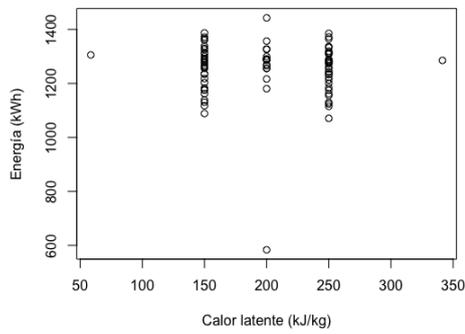
En las figuras 11.8e a 11.8g se ha representado la relación de la temperatura media de cambio de fase con el resto de variables. Estas figuras, junto con la 11.8c representan la influencia total de la temperatura media con el resto de variables. Como se ha comentado con anterioridad, existían dudas a priori sobre la mejor temperatura de cambio de fase para un material situado en el exterior. Como se puede observar en todos los gráficos, la disminución de la temperatura de cambio de fase parece tener un efecto positivo en la disminución de la demanda de energía, pero aún así, no parece que sea posible llegar a valores tan bajos como



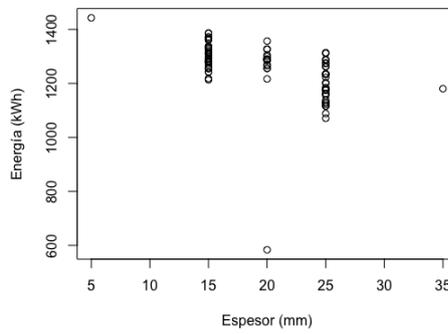
(a)



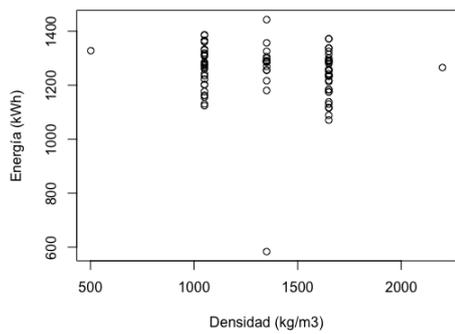
(b)



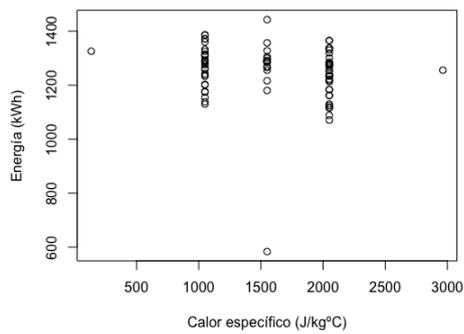
(c)



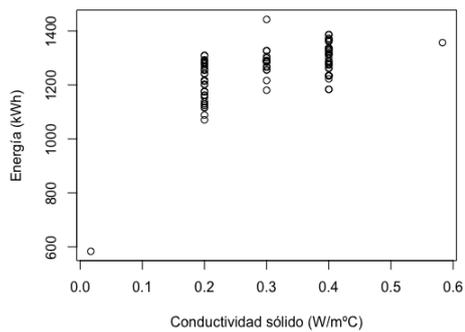
(d)



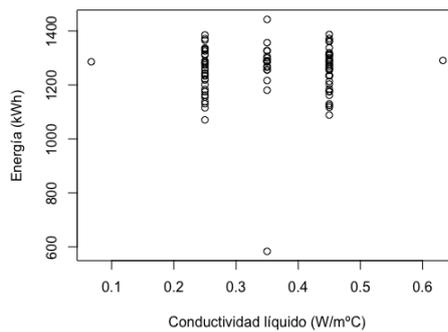
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 11.7: Evolución de la demanda de acondicionamiento con cada variable. Lote 1

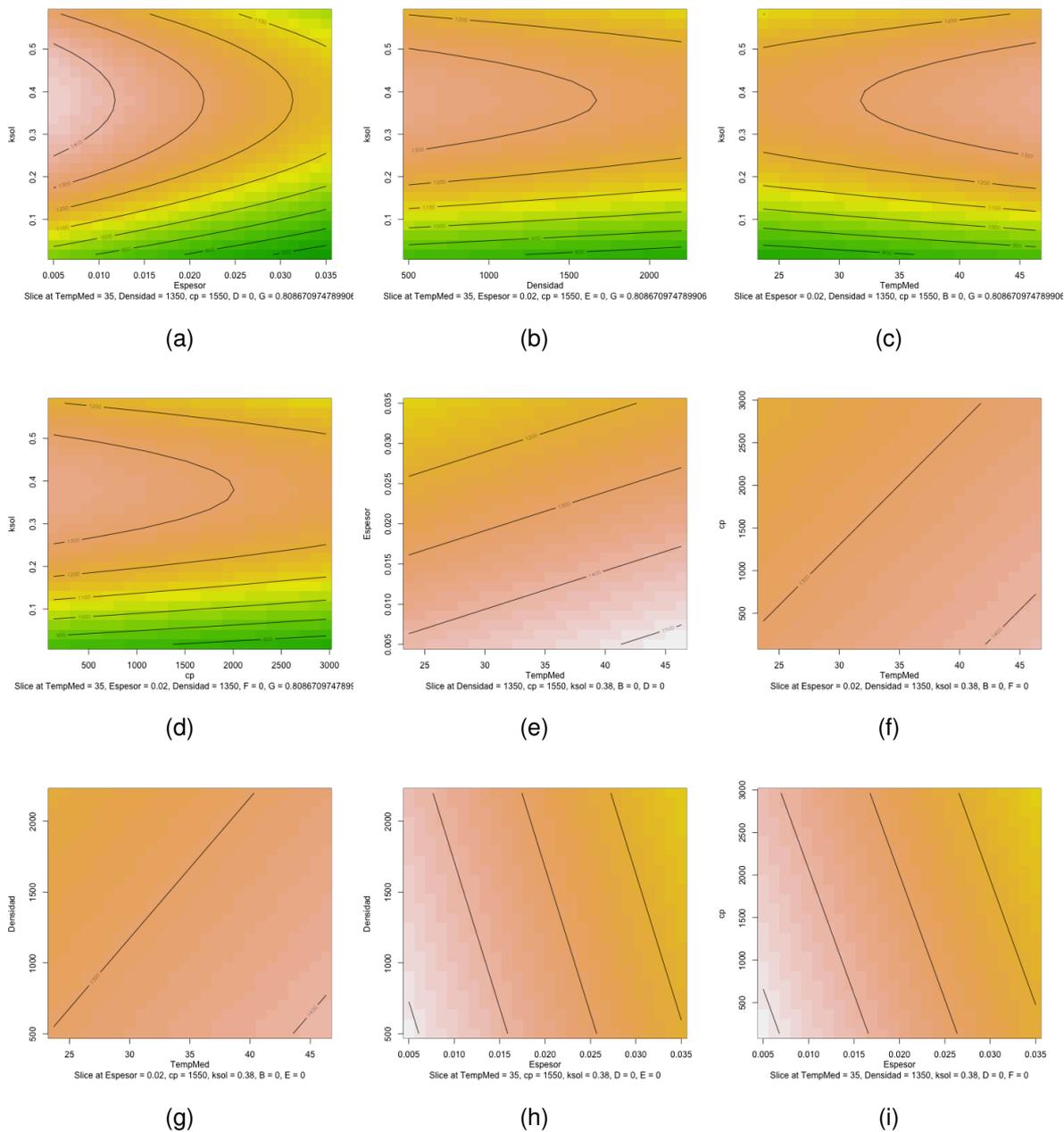


Figura 11.8: Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de acondicionamiento, lote 1



los del lote 2, con el PCM por el interior.

Finalmente, las figuras 11.8h y 11.8i se centran en la influencia del espesor de la capa de PCM. Como era de esperar, mayores espesores suponen una menor demanda de energía, igual que sucede con la densidad y el calor específico. Aún así, la influencia de estas dos últimas en la reducción de la demanda de energía es menor, como se puede apreciar de la pendiente de las líneas de contorno.

Por último, hay que hacer notar que la demanda de acondicionamiento no presenta ningún máximo o mínimo matemático en la zona de análisis, que se corresponde con los valores habituales de las variables termofísicas analizadas.

Tal y como se ha comentado previamente, existen dudas sobre el valor medio inicial que se ha seleccionado para la temperatura media de cambio de fase. Se ha seleccionado una temperatura de 35°C, pero tal y como se aprecia en los resultados del ajuste, una temperatura media menor puede suponer una reducción de la demanda de acondicionamiento. Se va a proceder por lo tanto a realizar más simulaciones para obtener información adicional sobre el comportamiento a menores temperaturas de cambio de fase.

**11.2.3.1.1. Dirección de descenso** El método de las superficies de respuesta permite analizar el ajuste calculado, para buscar la dirección de la máxima pendiente en la variación del parámetro analizado. Se puede usar este método tanto para el ajuste de primer orden, caso en el que se habla de dirección de ascenso/descenso máximo<sup>4</sup>, o sobre el ajuste de segundo orden, caso en el que se habla de análisis canónico.

En el caso de la demanda de acondicionamiento, interesa minimizar su valor, con lo que se analizará la dirección de descenso. El análisis canónico, basado en el ajuste de segundo orden, sólo devuelve opciones a mayor temperatura de cambio de fase. Por ese motivo, se va a analizar la dirección de descenso máximo, mediante el ajuste de primer orden. La secuencia de datos a analizar, se presenta en la tabla 11.9. La última columna representa el valor que tendría la demanda de acondicionamiento para el modelo de primero orden ajustado.

	$\Delta T$	$T_m$	$\lambda$	L	$\rho$	$c_p$	$k_{sol}$	$k_{liq}$	$\overline{Q_{hvac}}$
1	5.05	35.00	200000.00	0.020	1350.00	1550.00	0.30	0.35	1252.95
2	5.06	34.55	201000.00	0.021	1375.50	1599.50	0.26	0.35	1209.34
3	5.07	34.10	202000.00	0.023	1401.00	1649.50	0.23	0.35	1165.73
4	5.07	33.65	202950.00	0.024	1426.80	1699.00	0.19	0.35	1122.11
5	5.08	33.20	203950.00	0.026	1452.30	1749.00	0.15	0.35	1078.55
6	5.09	32.75	204950.00	0.027	1477.80	1798.50	0.12	0.35	1035.01
7	5.10	32.30	205950.00	0.029	1503.30	1848.50	0.08	0.34	991.40
8	5.10	31.85	206950.00	0.030	1528.80	1898.00	0.04	0.34	947.79
9	5.11	31.40	207900.00	0.032	1554.60	1948.00	0.01	0.34	904.15
10	5.12	30.95	208900.00	0.033	1580.10	1997.50	-0.03	0.34	860.56
11	5.13	30.50	209900.00	0.035	1605.60	2047.50	-0.07	0.34	816.94

Tabla 11.9: Secuencia de datos en la dirección de descenso máximo

Como se puede observar en la tabla 11.9, algunos de los valores no son válidos para las simulaciones. El espesor está cuantificado en intervalos de 5 mm. Además, la conductividad de estado sólido toma valores negativos. Lo que se va a hacer en este caso, es redondear el

<sup>4</sup>Dependiendo de si se desea maximizar o minimizar el parámetro analizado, la dirección será de ascenso, o de descenso

espesor al múltiplo de 5 mm más cercano, y mantener el valor menor de la conductividad en estado sólido a 0.01 W/mK para los valores negativos.

Con estos valores ajustados, se han realizado las diez simulaciones adicionales<sup>5</sup>. Se va a realizar una simulación más, con los valores de la simulación 11, pero sin el efecto del calor latente de cambio de fase, para poder comparar si el PCM está aportando una mejora real por su cambio de fase, es sólo el efecto de añadir una capa de baja conductividad lo que está provocando la mejora del comportamiento térmico.

El resultado de estas nuevas simulaciones se presenta en la tabla 11.10. En esta tabla los valores incorrectos mencionados están ya modificados. Además, se ha sustituido el primer ensayo 1 por el ensayo sin efecto de calor latente. Esto se ha realizado dando como valor de calor latente únicamente el efecto del calor sensible para el intervalo de temperatura de cambio de fase.

	$\Delta T$	$T_m$	$\lambda$	L	$\rho$	$c_p$	$k_{sol}$	$k_{liq}$	$Q_{hvac}$
1	5.13	30.50	10501.60	0.035	1605.60	2047.50	0.01	0.34	1080.25
2	5.06	34.55	201000.00	0.020	1375.50	1599.50	0.26	0.35	1261.34
3	5.07	34.10	202000.00	0.025	1401.00	1649.50	0.23	0.35	1147.54
4	5.07	33.65	202950.00	0.025	1426.80	1699.00	0.19	0.35	1111.07
5	5.08	33.20	203950.00	0.025	1452.30	1749.00	0.15	0.35	1061.18
6	5.09	32.75	204950.00	0.030	1477.80	1798.50	0.12	0.35	939.30
7	5.10	32.30	205950.00	0.030	1503.30	1848.50	0.08	0.34	814.76
8	5.10	31.85	206950.00	0.030	1528.80	1898.00	0.04	0.34	629.50
9	5.11	31.40	207900.00	0.030	1554.60	1948.00	0.01	0.34	604.56
10	5.12	30.95	208900.00	0.035	1580.10	1997.50	0.01	0.34	569.85
11	5.13	30.50	209900.00	0.035	1605.60	2047.50	0.01	0.34	581.50

Tabla 11.10: Resultado de las simulaciones en los datos de la dirección de descenso máximo

Estos datos se han representado en la figura 11.9. Como se puede observar, el valor mínimo corresponde con el ensayo 10. El siguiente ensayo, a menor temperatura media de cambio de fase, no ofrece un valor menor de la demanda de acondicionamiento, con lo que se entiende que la temperatura media óptima para la configuración con PCM por el exterior se corresponde con una temperatura media cercana a 31 °C. Además, del ensayo 1 realizado, sin calor latente, se observa que el material de cambio de fase aporta realmente un ahorro en el consumo total de energía de acondicionamiento, comparado con su ensayo gemelo con cambio de fase, el ensayo 11.

En vista de estos datos, parece que el punto medio elegido para el lote inicial de simulaciones, estaba un poco alejado de la zona de mayor interés. En el lote 1, como se puede apreciar en la tabla B.2, el valor central para la temperatura media era 35°C, y se simuló sobre todo la zona comprendida entre las temperaturas de 31 °C y 39 °C. De esta forma, la zona de interés que se acaba de descubrir quedó recogida solo de forma marginal.

Por ello, se ha decidido realizar un tercer lote de simulaciones, centradas en torno a los 31°C, recodificando el mismo diseño de experimentos que se ha venido utilizando, que se presenta en la tabla B.1, en torno a los 31 °C como temperatura media de cambio de fase. A este nuevo lote se le va a llamar Lote 3. Además de cambiar el punto central para la temperatura de cambio de fase, se va a modificar también la codificación del calor latente, para centrarla

<sup>5</sup>La primera simulación de la tabla 11.9 se corresponde con el punto central del diseño de experimentos, que ya ha sido simulado previamente

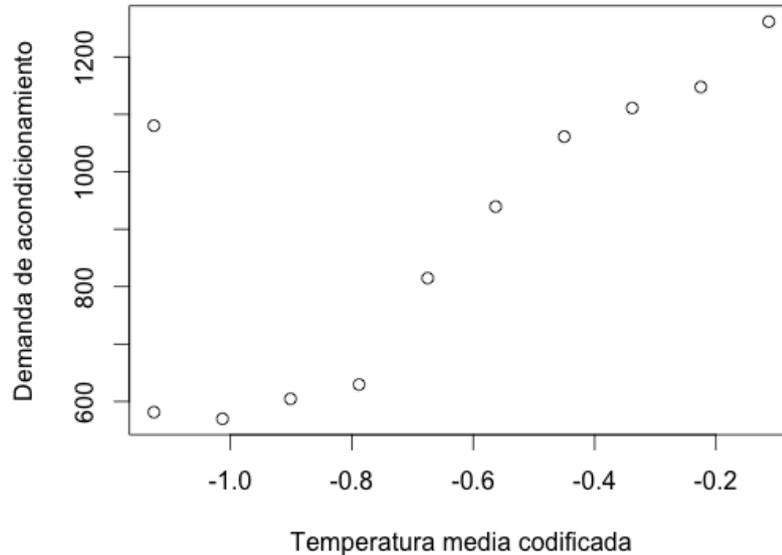


Figura 11.9: Demanda de acondicionamiento en función de la temperatura media de cambio de fase

en 210 kJ/kg, el espesor de la capa de PCM para centrarla en torno a 0.03 m, la densidad en torno a 1600 kg/m<sup>3</sup> y el calor específico en 2000 J/kgK. El resto de variables permanecen centradas en los mismos valores que para los lotes 1 y 2. En el apartado B.1 se representan todas estas codificaciones. Además, en la tabla B.4 se presentan los valores de las variables para cada una de las simulaciones de este nuevo lote 3.

El resultado de las simulaciones se presenta en la tabla B.8, y en el diagrama de caja de la figura 11.10, junto con los diagramas de caja del resto de lotes simulados. Como se puede observar, los resultados del lote 3 son notablemente mejores que los anteriores del lote1, y aunque se sitúa en el mismo nivel que el lote 0, sigue ofreciendo un comportamiento peor que el lote 2, con el PCM por el interior. El valor atípico menor que aparece, corresponde de nuevo con la simulación 80, para una conductividad térmica de sólo 0.02 W/m·K. Evidentemente, la gran resistencia térmica aportada por un valor tan bajo de la conductividad es la causante de la reducción de la demanda, en lugar del efecto del calor latente de cambio de fase. Los valores de las variables para la simulación 80 del lote 3 se presentan en la tabla

ID	$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (J/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)	$k_{liq}$ (W/m·K)
80	5.05	31.00	210000	0.030	16000	2000	0.02	0.350

Tabla 11.11: Propiedades de la simulación 80 del Lote 3

A continuación, se procede a analizar la superficie de respuesta de esta nueva configuración, intentando un ajuste de primer orden, y uno de segundo orden. Los coeficientes de

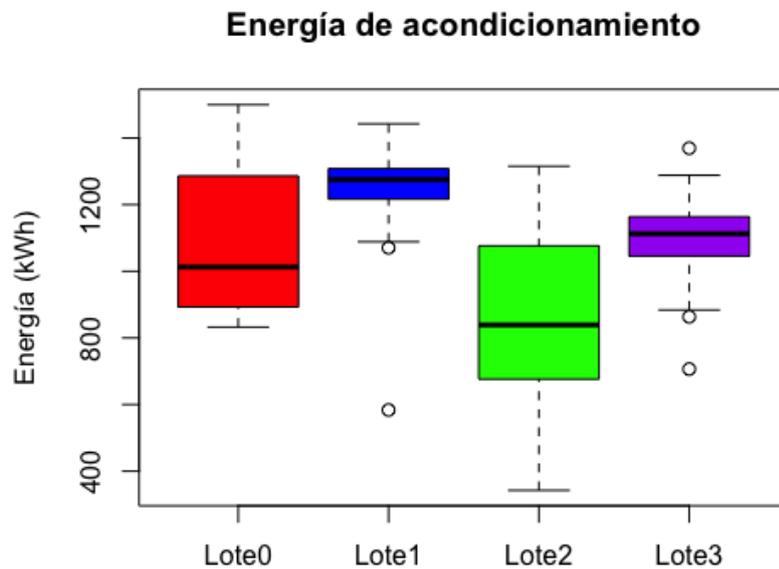


Figura 11.10: Diagrama de caja de la demanda de acondicionamiento, incluyendo el lote 3

ajuste de primer orden se presentan en la tabla 11.12, mientras que los de segundo orden están representados en la tabla 11.13.

Como se puede observar de los datos, el ajuste de segundo orden es ligeramente mejor en el caso de segundo orden, aunque analizando el valor de  $R^2$  ajustado la mejora no es muy notable. Con respecto a los valores de rechazo, el estadístico  $F$  es similar en ambos casos<sup>6</sup>, y el valor  $p$  es ligeramente peor en el caso de segundo orden, pero en ambos se encuentra muy lejos del valor de rechazo, que se ha fijado en el 5%.

Analizando ambos ajustes, se observa que los únicos términos lineales admisibles, con bajo valor de  $\Pr(>|t|)$ , son la variable B, que corresponde con la temperatura media de cambio de fase, la variable D, que corresponde con el espesor, la variable E, que corresponde con la densidad, la variable F, que corresponde con el calor específico, y la variable G que corresponde con la conductividad del PCM en estado sólido. Estos valores coinciden con lo que se observó en el lote 1.

Analizando el ajuste de segundo orden, se pueden observar los efectos cruzados entre variables, y la posible existencia de términos cuadráticos. Así, se observa una interrelación entre las variables B y F, temperatura media de cambio de fase y calor específico, y términos cuadráticos para B y G, temperatura media de cambio de fase, y conductividad en estado sólido.

En vista de estos resultados, se decide mejorar el ajuste, eliminando variables de baja significancia. Se va a realizar de manera secuencial, comenzando por aquellas que presentan

<sup>6</sup>Aunque el valor de  $F$  en el caso de primer orden es superior, está calculado sobre distintos valores de grados de libertad, y ambos están igual de cercanos a los valores de corte



	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	1096.3183	6.0755	180.45	0.0000
A	1.5292	6.2625	0.24	0.8077
B	22.4694	6.2625	3.59	0.0006
C	-6.4665	6.2625	-1.03	0.3051
D	-54.5088	6.1856	-8.81	0.0000
E	-25.1747	6.2625	-4.02	0.0001
F	-28.7412	6.2625	-4.59	0.0000
G	64.7859	6.2625	10.35	0.0000
H	3.4381	6.2625	0.55	0.5846
R <sup>2</sup> múltiple			0.7566	
R <sup>2</sup> ajustado			0.7309	
Estadístico F			29.52 sobre 8 y 76	
Valor p			< 2.2e-16	

Tabla 11.12: Coeficientes de ajuste de la demanda de acondicionamiento, lote 3, primer orden

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	1112.0877	23.1151	48.11	0.0000
A	1.5292	5.7802	0.26	0.7927
B	22.4694	5.7802	3.89	0.0004
C	-6.4665	5.7802	-1.12	0.2699
D	-54.5088	5.7093	-9.55	0.0000
E	-25.1747	5.7802	-4.36	0.0001
F	-28.7412	5.7802	-4.97	0.0000
G	64.7859	5.7802	11.21	0.0000
H	3.4381	5.7802	0.59	0.5553
A:B	-2.1107	6.4625	-0.33	0.7457
A:C	-3.2017	6.4625	-0.50	0.6230
A:D	-1.7452	6.4625	-0.27	0.7885
A:E	0.1547	6.4625	0.02	0.9810
A:F	0.6593	6.4625	0.10	0.9192
A:G	-2.6462	6.4625	-0.41	0.6844
A:H	-2.2796	6.4625	-0.35	0.7261
B:C	3.9374	6.4625	0.61	0.5458
B:D	3.5477	6.4625	0.55	0.5861
B:E	1.9728	6.4625	0.31	0.7617
B:F	-19.1021	6.4625	-2.96	0.0052
B:G	4.5268	6.4625	0.70	0.4877
B:H	-2.6965	6.4625	-0.42	0.6787
C:D	2.0742	6.4625	0.32	0.7499
C:E	-0.1307	6.4625	-0.02	0.9840
C:F	0.4754	6.4625	0.07	0.9417
C:G	2.4232	6.4625	0.37	0.7097
C:H	0.4792	6.4625	0.07	0.9413
D:E	-5.5311	6.4625	-0.86	0.3972
D:F	-5.7564	6.4625	-0.89	0.3784
D:G	9.9364	6.4625	1.54	0.1320
D:H	-1.2899	6.4625	-0.20	0.8428
E:F	-7.8014	6.4625	-1.21	0.2345
E:G	2.4640	6.4625	0.38	0.7050
E:H	-0.0032	6.4625	-0.00	0.9996
F:G	4.5086	6.4625	0.70	0.4894
F:H	-0.2315	6.4625	-0.04	0.9716
G:H	-1.4960	6.4625	-0.23	0.8181
A^2	-1.6331	5.2238	-0.31	0.7562
B^2	15.9689	5.2238	3.06	0.0040
C^2	-0.6658	5.2238	-0.13	0.8992
D^2	-2.2877	4.6795	-0.49	0.6276
E^2	-2.4705	5.2238	-0.47	0.6388
F^2	-3.4374	5.2238	-0.66	0.5143
G^2	-20.1745	5.2238	-3.86	0.0004
H^2	-1.9975	5.2238	-0.38	0.7042
R <sup>2</sup> múltiple			0.8908	
R <sup>2</sup> ajustado			0.7708	
Estadístico F			7.42 sobre 44 y 40	
Valor p			1.557e-09	

Tabla 11.13: Coeficientes de ajuste de la demanda de acondicionamiento, lote 3, segundo orden

peor ajuste, definido en función de valores elevados para  $Pr(>|t|)$ . Esto puede permitir que variables que en estos momentos presentan un peor ajuste, pero cercano al corte, mejoren sus coeficientes, y se puedan tener en cuenta.

En la tabla 11.14 se presenta el ajuste final, con las variables más significativas. Como se puede observar, este nuevo ajuste presenta una mejora significativa en todos los indicadores, tanto en los valores de ajuste  $R^2$ , como en los estadísticos de rechazo  $F$  y valor  $p$ .

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	1097.6803	7.1467	153.59	0.0000
B	22.4694	4.7271	4.75	0.0000
D	-54.5088	4.6691	-11.67	0.0000
E	-25.1747	4.7271	-5.33	0.0000
F	-28.7412	4.7271	-6.08	0.0000
G	64.7859	4.7271	13.71	0.0000
B:F	-19.1021	5.2850	-3.61	0.0005
B <sup>2</sup>	17.3482	3.9322	4.41	0.0000
G <sup>2</sup>	-18.7952	3.9322	-4.78	0.0000
R <sup>2</sup> múltiple			0.8908	
R <sup>2</sup> ajustado			0.7708	
Estadístico F			7.42 sobre 44 y 40	
Valor p			1.557e-09	

Tabla 11.14: Coeficientes de ajuste de la demanda de acondicionamiento, lote 3, mejorado

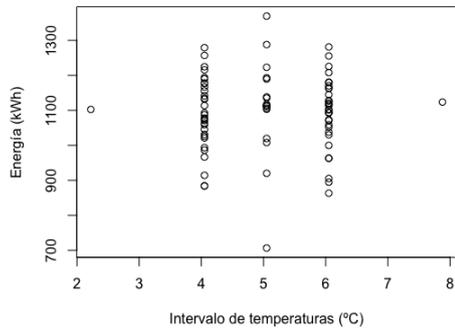
Las variables de interés siguen siendo las mismas analizadas con anterioridad, la temperatura media de cambio de fase, espesor, densidad, calor específico y conductividad de estado sólido. Además, presenta un término cruzado entre temperatura media y calor específico. Finalmente, el ajuste presenta términos cuadráticos para la temperatura media de cambio de fase, y para la conductividad en estado sólido.

Para un primer análisis, se ha representado cada una de las variables en función de la demanda de acondicionamiento para este lote 3, para poder observar las tendencias generales. Estas relaciones se han representado en la figura 11.11. Igual que sucedía con el lote 1, y se preveía del modelo mejorado para este lote 3, ni el intervalo de temperaturas (figura 11.11a), ni el calor latente (figura 11.11c) ni la conductividad de estado líquido (figura 11.11h) presentan ninguna influencia sobre la demanda de acondicionamiento.

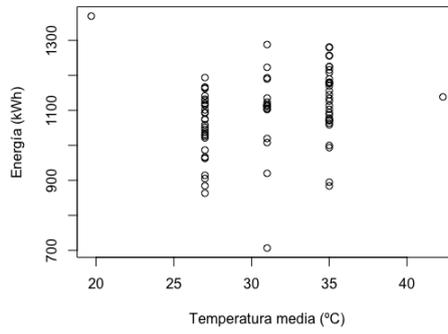
Respecto a la temperatura media de cambio de fase (figura 11.11b), su comportamiento es bastante complejo. La figura muestra una tendencia a la reducción de la demanda de acondicionamiento al disminuir la temperatura media, más notable en la parte alta de la figura. Sin embargo, al analizar la parte baja del gráfico aparenta un mínimo para una temperatura cercana a la central de la simulación, que es de 31 °C. Esta variable presenta un término cuadrático en el ajuste del modelo mejorado (tabla 11.14), con lo que se podría corresponder con la presencia de un mínimo para una temperatura media en esta zona.

Finalmente, para el resto de variables, el espesor (figura 11.11d), la densidad (figura 11.11e), y el calor específico (figura 11.11f) reducen la demanda de acondicionamiento al aumentar sus valores, mientras que para la conductividad de estado sólido (figura 11.11g) la demanda disminuye al disminuir su valor.

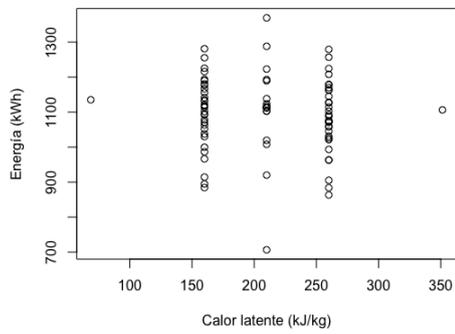
En vista de que existe una interrelación bastante compleja, se procede a la representación gráfica de las variables, tomadas de dos en dos, para analizar también relaciones mutuas entre variables. Esta relación se ha presentado en las figuras 11.12. Para las variables no



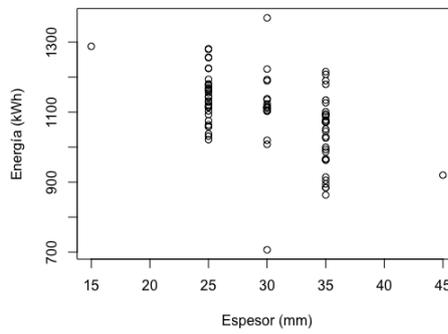
(a)



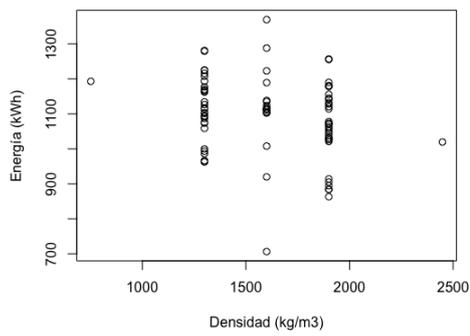
(b)



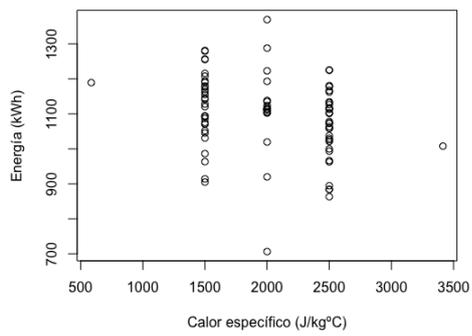
(c)



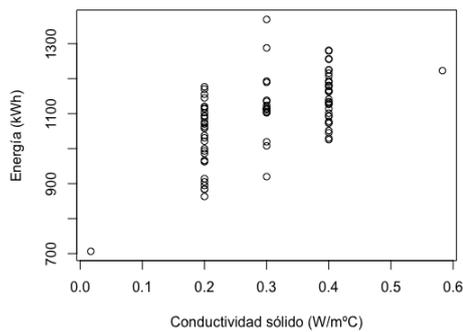
(d)



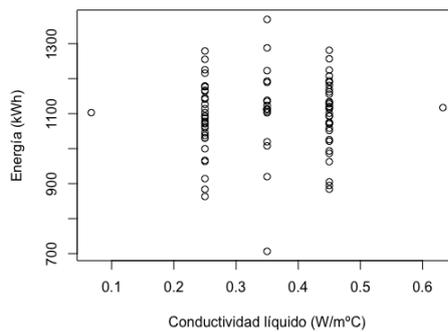
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 11.11: Evolución demanda de acondicionamiento con cada variable. Lote 3

representadas en cada figura, se han tomado los valores de la tabla 11.15.

$T_m$ (°C)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)
31	0.03	1600	2000	0.3

Tabla 11.15: Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.12

La temperatura media de cambio de fase se representa en las figuras 11.12a a 11.12d. El valor óptimo para esta variable se presenta en la zona central del ensayo, en torno a 29 °C. Sin embargo, y tal y como se observa en la figura 11.12c, el valor más adecuado para la temperatura media de cambio de fase puede variar en función del valor del calor efectivo. Para valores mayores de  $c_p$ , el valor adecuado para la temperatura de cambio de fase aumenta, por encima de 30 °C.

Estos valores demuestran que desplazar la simulación a la nueva zona de ensayos, generando el lote 3, ha resultado un acierto, puesto que se ha analizado en profundidad la zona de interés para la temperatura media de cambio de fase. Respecto al resto de parámetros relacionados con el cambio de fase, ni el intervalo de cambio de fase ni el calor latente parece tener influencia significativa en la demanda energética, al menos en la zona de valores analizados, que como se ha comentado, corresponde con los valores habituales.

Con respecto al resto de factores, no presentan ningún efecto digno de mención, y se comportan como en la transferencia de calor habitual. Aumentar el espesor, la densidad o el calor específico, o disminuir la conductividad, reducen la demanda de energía para el acondicionamiento del cubículo interior. Cabe destacar en la zona de análisis no se encuentra ningún valor óptimo para estas variables que consiga una demanda de energía mínima, sino que las tendencias demuestran que esos valores óptimos se encontrarían fuera de los rangos habituales para estas variables.

A modo de conclusión, la adición de un material de cambio de fase presenta una ligera mejora para la reducción de la demanda total de acondicionamiento, siendo la temperatura media de cambio de fase la única variable relacionada con el cambio de fase que presenta alguna influencia en la demanda, encontrándose el óptimo en torno a 29 °C, aunque puede aumentar esta temperatura al usar valores altos del calor específico. El resto de variables, como el espesor, la densidad, el calor específico o las conductividades presentan la tendencia habitual de la transferencia de calor, disminuyendo la demanda al aumentar todas las variables excepto las conductividades, que presentan la tendencia inversa.

### 11.2.3.2. PCM exterior. Demanda de calefacción

El siguiente parámetro a analizar, ha sido la demanda de calefacción del cubículo, la energía necesaria para mantenerlo por encima de las temperaturas de consigna en invierno. Teniendo en cuenta que para la configuración del PCM por el exterior se han realizado dos lotes de simulaciones, el primer paso debe ser analizar cuál de los lotes presenta mejor comportamiento para la demanda de calefacción. En la figura 11.13 se representa el diagrama de

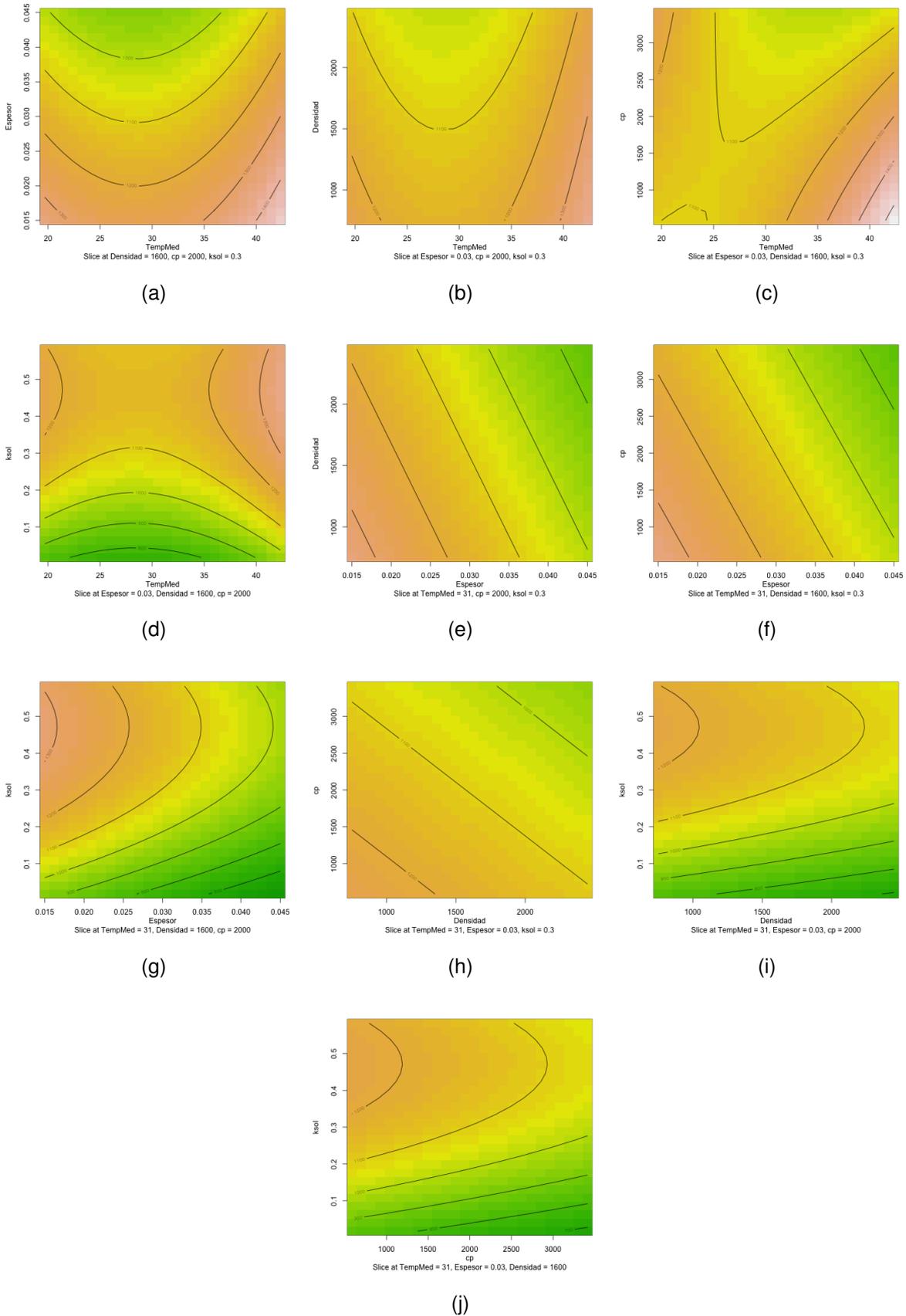


Figura 11.12: Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de acondicionamiento, lote 3

caja para la demanda de calefacción de todos los lotes.

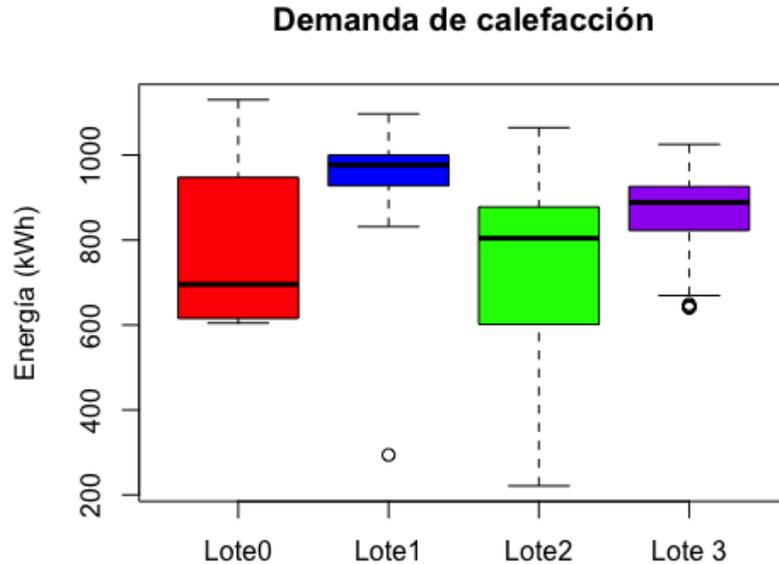


Figura 11.13: Diagrama de caja para la demanda de calefacción, incluyendo el lote 3

El lote 3 presenta valores mejores para la demanda de calefacción que el lote 1, aunque sigue sin superar el lote 2, con el PCM por el interior. Por lo tanto, para analizar el comportamiento del PCM en el exterior del cerramiento, se va a analizar el lote 3.

Como se puede observar en la tabla B.8, el lote 3 presenta una demanda de calefacción que varía entre los 1025 kWh de la simulación 73, y las demandas ligeramente por encima de 640 kWh de las simulaciones 5, 20 y 80. Los valores de las variables para estas simulaciones que presentan los valores más bajos de la demanda de calefacción se encuentran en la tabla 11.16. De nuevo aparece la simulación 80, que presenta una conductividad de estado sólido

ID	$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (J/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)	$k_{liq}$ (W/m·K)
5	6.05	35.00	160000.00	0.04	1900.00	2500.00	0.20	0.45
20	4.05	35.00	260000.00	0.04	1900.00	2500.00	0.20	0.25
80	5.05	31.00	210000.00	0.03	1600.00	2000.00	0.02	0.35

Tabla 11.16: Propiedades de simulación para el Lote 3 con demanda de calefacción mínima

extremadamente baja. Para las simulaciones 5 y 20 los valores en común que poseen son una temperatura media de cambio de fase alta, igual que el espesor, la densidad y el calor específico, y una conductividad de estado sólido baja, pero sin ser los valores extremos de estas variables en el lote de simulación. Se podría decir por lo tanto que la influencia de aumentar cada una de estas variables de manera conjunta es superior a la de aumentar mucho sólo una de ellas, como se realiza en las corridas axiales de la simulación<sup>7</sup>, que son las que ofrecen los

<sup>7</sup>Para estas variables, las corridas axiales de valor más elevado son las simulaciones 78, 71, 83 y 69



resultados más elevados de cada variable. Para el caso de la conductividad de estado sólido sí que disminuir al máximo su valor consigue reducir de manera significativa la demanda de calefacción, como se demuestra en la simulación 80.

Siguiendo con el análisis, se ha realizado un ajuste de primer orden y otro de segundo orden sobre el valor de la demanda de calefacción para el lote 3, que se presentan en las tablas 11.17 y 11.18 respectivamente.

El primer resultado sorprendente es que ninguno de los parámetros relacionados con el cambio de fase parece tener influencia sobre la demanda de calefacción. Sólo aparece un término cruzado entre las variables B y F, la temperatura media de cambio de fase y el calor específico. Tampoco la conductividad de fase líquida tiene influencia en el resultado final.

Respecto a los coeficientes de ambos ajustes, se observa que los dos modelos tienen muy buen comportamiento, aunque el de segundo orden presenta un comportamiento notablemente superior. En concreto, el valor de los coeficientes  $R^2$  es notablemente elevado para el ajuste de segundo orden.

En vista de que hay varias variables que parecen no aportar al ajuste de la demanda de calefacción, se ha mejorado el modelo, para eliminar estas variables del ajuste. Se han ido eliminando de manera secuencial para recuperar las variables que están más cercanas a los valores de corte. El modelo final mejorado se presenta en la tabla 11.19.

La relación obtenida entre las variables presenta términos cruzados y elementos cuadráticos para el calor específico (variable F) y la conductividad de estado sólido (variable G)<sup>8</sup>.

Se puede observar que todavía quedan elementos por encima del valor de corte para  $\Pr(>|t|)$ , que es del 5 %, pero eliminarlos no mejoraba los coeficientes de ajuste, con lo que se ha decidido mantenerlos. El más notable de estas variables sería la variable B, que corresponde con la temperatura media de cambio de fase. Su valor de  $\Pr(>|t|)$  está por encima del 25 %. De todos modos, al aparecer el término cruzado B:F con el calor específico, se ha decidido mantener también el término lineal. Se acostumbra a no eliminar los términos de menor orden de los ajustes, su existen términos de orden mayor. Por eso, no se eliminaría el término de primer orden de la variable B, a la parecer el término cruzado B:F<sup>9</sup>. Se ha probado a eliminar los términos cruzados de las variables D y E, además del cuadrático de D<sup>10</sup>, pero estos cambios empeoraban el valor de  $R^2$  ajustado, con lo que se ha decidido mantener estos términos.

Para disponer de más información respecto al comportamiento de los PCMs por el exterior en la disminución de la demanda de calefacción, se ha procedido a representar la demanda de calefacción en función de cada una de las variables analizadas, en la figura 11.14.

Como se puede observar, ni el intervalo de temperaturas de cambio de fase (figura 11.14a), ni el calor latente (figura 11.14c), ni la conductividad de estado líquido (figura 11.14h), presentan una influencia clara sobre la demanda de calefacción.

<sup>8</sup>Además del término cuadrático para el espesor (variable D), que por su bajo coeficiente y elevado valor de corte  $\Pr(>|t|)$ , apenas aporta al resultado final de la demanda de acondicionamiento

<sup>9</sup>De hecho, el paquete de superficies de respuesta empleado  $r_{SM}$ , no permite eliminar estos términos de menor orden si están presentes términos de orden superior

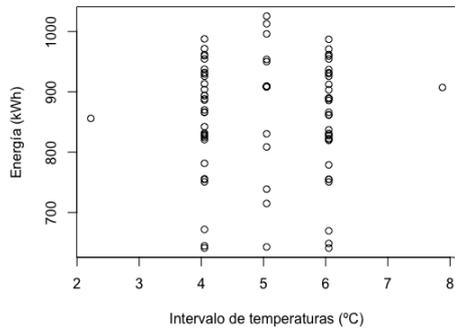
<sup>10</sup>La variable D se corresponde con el espesor de la capa de PCM, y la variable E se corresponde con la densidad

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	861.9368	4.3976	196.00	0.0000
A	1.2669	4.5329	0.28	0.7806
B	3.8028	4.5329	0.84	0.4041
C	0.5500	4.5329	0.12	0.9037
D	-50.1637	4.4773	-11.20	0.0000
E	-24.2959	4.5329	-5.36	0.0000
F	-22.4111	4.5329	-4.94	0.0000
G	61.5586	4.5329	13.58	0.0000
H	-0.3087	4.5329	-0.07	0.9459
R <sup>2</sup> múltiple		0.8272		
R <sup>2</sup> ajustado		0.8091		
Estadístico F		45.49 sobre 8 y 76		
Valor p		< 2.2e-16		

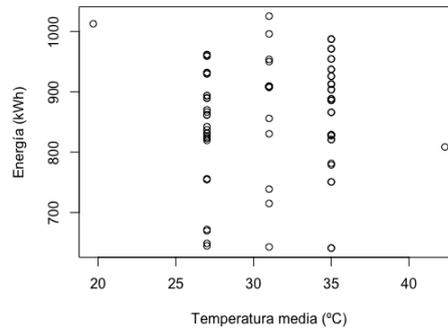
Tabla 11.17: Coeficientes de ajuste de la demanda de calefacción, lote 3, primer orden

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	907.8431	16.3289	55.60	0.0000
A	1.2669	4.0833	0.31	0.7580
B	3.8028	4.0833	0.93	0.3573
C	0.5500	4.0833	0.13	0.8935
D	-50.1637	4.0332	-12.44	0.0000
E	-24.2959	4.0833	-5.95	0.0000
F	-22.4111	4.0833	-5.49	0.0000
G	61.5586	4.0833	15.08	0.0000
H	-0.3087	4.0833	-0.08	0.9401
A:B	0.4301	4.5652	0.09	0.9254
A:C	-0.5062	4.5652	-0.11	0.9123
A:D	0.0932	4.5652	0.02	0.9838
A:E	0.1355	4.5652	0.03	0.9765
A:F	0.4433	4.5652	0.10	0.9231
A:G	0.1413	4.5652	0.03	0.9755
A:H	-3.2888	4.5652	-0.72	0.4755
B:C	-0.5196	4.5652	-0.11	0.9099
B:D	4.0625	4.5652	0.89	0.3788
B:E	3.0751	4.5652	0.67	0.5044
B:F	-15.5435	4.5652	-3.40	0.0015
B:G	-3.2303	4.5652	-0.71	0.4833
B:H	0.3769	4.5652	0.08	0.9346
C:D	-0.0645	4.5652	-0.01	0.9888
C:E	-0.0582	4.5652	-0.01	0.9899
C:F	-0.0020	4.5652	-0.00	0.9997
C:G	-0.2157	4.5652	-0.05	0.9626
C:H	0.6801	4.5652	0.15	0.8823
D:E	-9.2772	4.5652	-2.03	0.0488
D:F	-6.2933	4.5652	-1.38	0.1757
D:G	13.2725	4.5652	2.91	0.0059
D:H	0.0859	4.5652	0.02	0.9851
E:F	-5.2898	4.5652	-1.16	0.2534
E:G	6.1079	4.5652	1.34	0.1885
E:H	-0.1565	4.5652	-0.03	0.9728
F:G	3.7351	4.5652	0.82	0.4181
F:H	-0.1795	4.5652	-0.04	0.9688
G:H	0.0864	4.5652	0.02	0.9850
A^2	-5.9349	3.6902	-1.61	0.1156
B^2	-2.2883	3.6902	-0.62	0.5387
C^2	-2.5708	3.6902	-0.70	0.4900
D^2	-4.9551	3.3057	-1.50	0.1417
E^2	-4.6174	3.6902	-1.25	0.2181
F^2	-12.0733	3.6902	-3.27	0.0022
G^2	-13.7048	3.6902	-3.71	0.0006
H^2	-2.5070	3.6902	-0.68	0.5008
R <sup>2</sup> múltiple		0.9262		
R <sup>2</sup> ajustado		0.8451		
Estadístico F		11.41 sobre 44 y 40		
Valor p		1.335e-12		

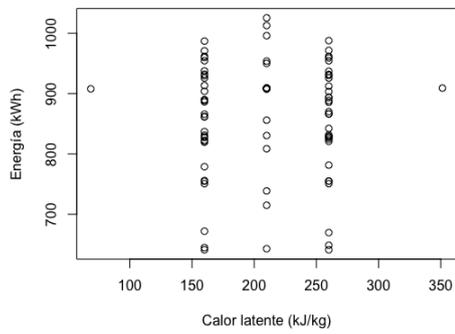
Tabla 11.18: Coeficientes de ajuste de la demanda de calefacción, lote 3, segundo orden



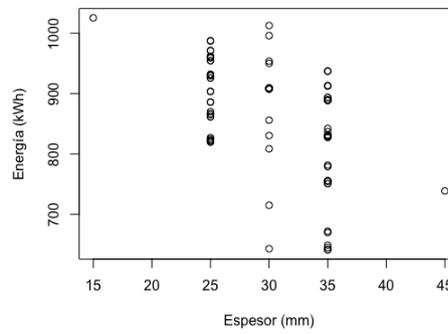
(a)



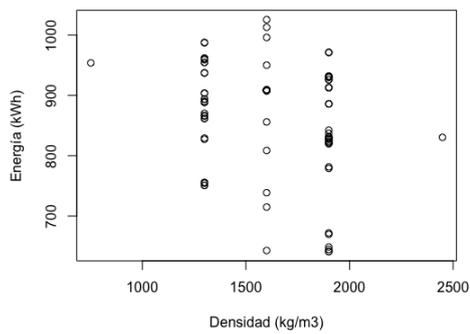
(b)



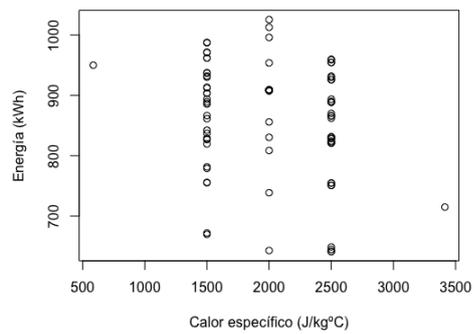
(c)



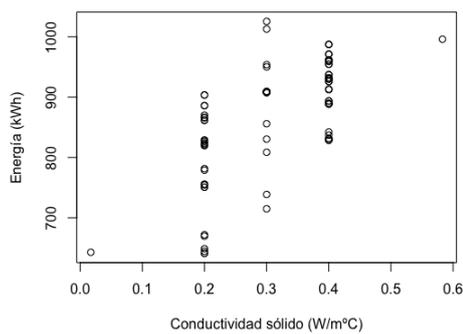
(d)



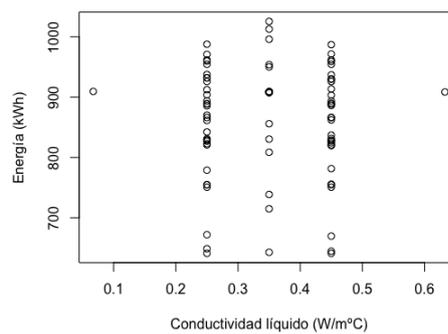
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 11.14: Evolución de la demanda de calefacción con cada variable. Lote 3

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	884.9692	5.8690	150.79	0.0000
B	3.8028	3.3399	1.14	0.2590
D	-50.1637	3.2989	-15.21	0.0000
E	-24.2959	3.3399	-7.27	0.0000
F	-22.4111	3.3399	-6.71	0.0000
G	61.5586	3.3399	18.43	0.0000
B:D	4.0625	3.7341	1.09	0.2806
B:E	3.0751	3.7341	0.82	0.4132
B:F	-15.5435	3.7341	-4.16	0.0001
B:G	-3.2303	3.7341	-0.87	0.3901
D:E	-9.2772	3.7341	-2.48	0.0155
D:F	-6.2933	3.7341	-1.69	0.0966
D:G	13.2725	3.7341	3.55	0.0007
E:F	-5.2898	3.7341	-1.42	0.1613
E:G	6.1079	3.7341	1.64	0.1067
F:G	3.7351	3.7341	1.00	0.3208
D^2	-2.9586	2.4928	-1.19	0.2395
F^2	-9.9039	2.7957	-3.54	0.0007
G^2	-11.5354	2.7957	-4.13	0.0001
R <sup>2</sup> múltiple			0.9186	
R <sup>2</sup> ajustado			0.8963	
Estadístico F			41.35 sobre 18 y 60	
Valor p			< 2.2e-16	

Tabla 11.19: Coeficientes de ajuste de la demanda de calefacción, lote 3, mejorado

Respecto a la temperatura media de cambio de fase (figura 11.14b), la relación no es nada clara, y a priori parecería que su influencia tampoco es notable. De hecho, observando los coeficientes de ajuste del modelo mejorado de la tabla 11.19, la temperatura media (variable B) sólo presenta coeficientes significativos para el término cruzado con el calor efectivo. Por lo tanto se analizará más adelante con la interrelación entre variables.

Para el resto de variables, las tendencias son evidentes, y la demanda de calefacción disminuye al aumentar el espesor (figura 11.14d), la densidad (figura 11.14e), y el calor específico (figura 11.14f), o disminuir la conductividad de estado sólido (figura 11.14g).

Se ha representado también gráficamente la relación entre cada par de variables, en las figuras 11.15. Para calcular cada gráfico, a las variables no representadas se les ha asignado los valores medios del lote de simulaciones, que aparecen en la tabla 11.20.

$T_m$ (°C)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	cp (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)
31	0.03	1600	2000	0.3

Tabla 11.20: Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.15

La única variable presente en el ajuste relacionada con el cambio de fase es la temperatura media, que se representa en las figuras 11.15a a 11.15d. Como se puede observar, en todas interrelaciones la temperatura de cambio de fase apenas influye en la demanda de calefacción, salvo para la relación con el calor específico, de la figura 11.15c. Aún así, se observa que aumentar el espesor y reducir la temperatura media de cambio de fase reduce ligeramente la demanda (figura 11.15a), igual que sucede disminuyendo la conductividad de estado sólido y la temperatura media (figura 11.15d). Respecto a la densidad, la interrelación entre las dos variables es muy débil.

Analizando la interrelación entre la temperatura media de cambio de fase y el calor específico de la figura 11.15c, se observa un punto de silla en la zona central de la figura, y una

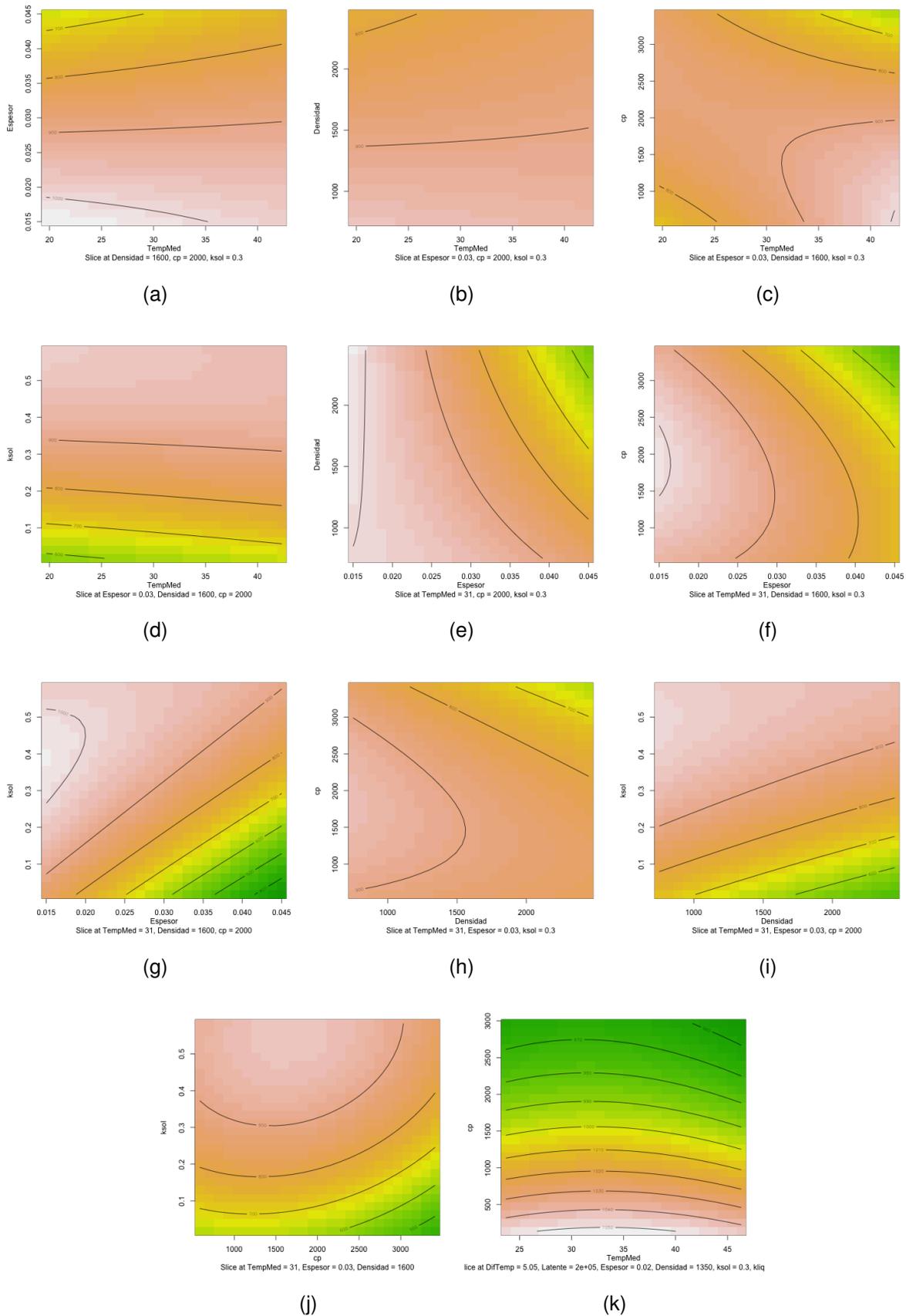


Figura 11.15: Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de calefacción, lote 3

mejora importante de la demanda de calefacción para valores elevados de la temperatura media de cambio de fase y del calor específico. Aún así, los valores de demanda de calefacción se situarían en torno a 640 kWh, pero todavía lejos de la demanda que se consigue situando el PCM por el interior, como se observa en el diagrama de caja de la figura 11.13. De todos modos, hay que tener en cuenta que esa zona de baja demanda de calefacción se encuentra por encima de los 35 °C, para los que las simulaciones sólo tienen un ensayo único para 42.3 °C, y por lo tanto no es más que una extrapolación de las tendencias del ensayo del lote 3. La zona de mayores temperaturas de cambio de fase ya se había simulado en el lote 1, con lo que se ha representado en la figura 11.15k la interrelación entre temperatura media y calor específico para el lote 1. Como se puede observar en el ajuste para la zona de diferencias de temperatura elevadas, la demanda de calefacción sigue siendo elevada, por encima de 900 kWh.

Respecto al resto de variables, siguen las tendencias habituales de la transferencia de calor, disminuyendo la demanda al aumentar el espesor, densidad y calor específico, y disminuir la conductividad.

Como conclusión, la adición de un material de cambio de fase por el exterior no presenta ninguna mejora respecto a la demanda de calefacción, al contrario de lo que sucedía con la demanda total de acondicionamiento. Se ha simulado el comportamiento de una capa de PCM para temperaturas entre 19 °C y 46 °C<sup>11</sup>, y en toda esa ventana de temperaturas medias de cambio de fase no se ha encontrado ninguna influencia de las variables relacionadas con el cambio de fase, y se observa que el comportamiento general tanto del lote 1, como del lote 3, es peor que el lote 0 en el que sólo se han usado materiales convencionales.

### 11.2.3.3. PCM exterior. Demanda de refrigeración

El diagrama de caja de la figura 11.16 representa la demanda de refrigeración de cada uno de los lotes de simulaciones realizados. Para las configuraciones con el PCM por el exterior se han realizado dos lotes de simulaciones, el lote 1 y el lote 3. Tal y como se puede observar en el diagrama de caja, el lote 3 reduce notablemente la demanda de refrigeración respecto al lote 1, situandola claramente por debajo del lote 1, y del lote 0. Además, la demanda de refrigeración se equipara a la parte alta de la demanda del lote 2, con el PCM por el interior. Se puede deducir por lo tanto que la adición de un PCM por el exterior con las condiciones del lote 3 sí que presenta una ventaja sobre los materiales convencionales para la demanda de refrigeración, aunque sigue ofreciendo una mejora menor que la adición del material por el interior.

La demanda de refrigeración del lote 3 presenta un valor atípico por debajo de los 100 kWh. Este valor se corresponde con la simulación 80, y es la misma que ha presentado valores atípicamente bajos para el resto de parámetros, correspondiéndose con el valor mínimo de la

<sup>11</sup>Aunque no aparece aquí representado, por obtener resultados peores para la demanda de calefacción, el ajuste para el lote 1 obtiene el mismo resultado, en el sentido de no presentar ninguna influencia de las variables relacionadas con el cambio de fase en la demanda de calefacción

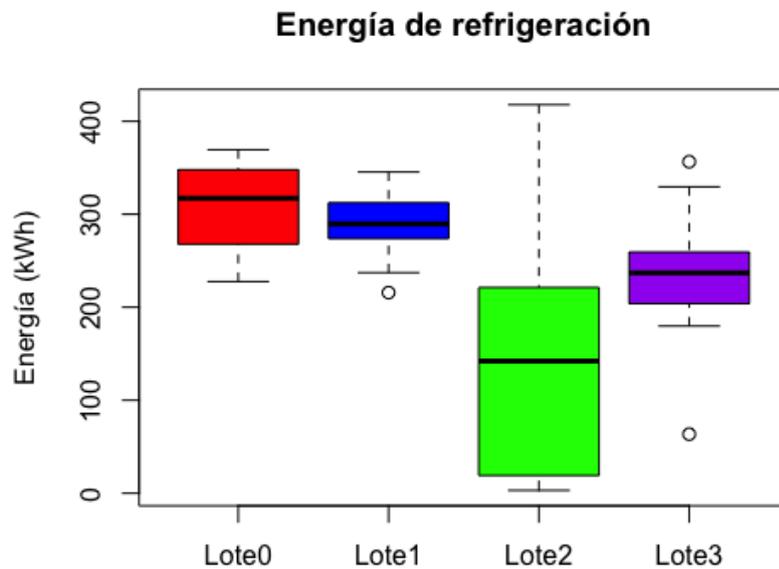


Figura 11.16: Diagrama de caja para la demanda de refrigeración con el lote 3

conductividad de estado sólido. Para el lote 3 ese valor mínimo de conductividad es de 0.02 W/m·K. Los valores para el resto de variables se han representado previamente en la tabla 11.11, de la página 208.

Las tablas 11.21 y 11.22 presentan los coeficientes de ajuste iniciales de primer y segundo orden para la demanda de refrigeración del lote 3.

El ajuste de primer orden presenta unos valores de ajuste bastante bajo para los coeficientes  $R^2$ . El estadístico  $F$  y el valor  $p$  también presentan unos valores mediocres, pero están dentro de los parámetros de aceptación<sup>12</sup>.

El ajuste de segundo orden presenta mejores valores para los coeficientes  $R^2$ , aunque el valor de  $R^2$  es bastante bajo. Este valor tan bajo es normal teniendo en cuenta que se han incluido gran número de variables en el análisis que parecen no ejercer ninguna influencia, como veremos más adelante. Esto provoca una mejora del coeficiente  $R^2$  múltiple, y un empeoramiento de  $R^2$  ajustado. Respecto al estadístico  $F$  y el valor  $p$ , igual que sucede con el ajuste de primer orden, los valores no son tan buenos como en los análisis anteriores, pero aún así se encuentran dentro de los límites de aceptación<sup>13</sup>.

Como se puede observar en ambos ajustes, para la demanda de refrigeración inicialmente parece que las únicas variables que ejercen alguna influencia son la temperatura media de cambio de fase, y el calor latente, además del calor específico y la conductividad de estado

<sup>12</sup>Para una configuración de 8 grados de libertad sobre 76 el valor de corte para  $F$  sería de 2.06, con lo que el valor de 3.706 es superior, y por lo tanto es admisible. Respecto al valor  $p$ , el valor de corte es del 5%, y el ajuste de primero orden está por debajo de ese valor

<sup>13</sup>En este caso, el valor límite de  $F$  es de 1.68, y el del valor  $p$  sigue siendo el 5%

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	234.3815	3.9130	59.90	0.0000
A	0.2623	4.0335	0.07	0.9483
B	18.6666	4.0335	4.63	0.0000
C	-7.0165	4.0335	-1.74	0.0860
D	-4.3451	3.9840	-1.09	0.2789
E	-0.8788	4.0335	-0.22	0.8281
F	-6.3301	4.0335	-1.57	0.1207
G	3.2272	4.0335	0.80	0.4261
H	3.7468	4.0335	0.93	0.3559
R <sup>2</sup> múltiple			0.2807	
R <sup>2</sup> ajustado			0.2049	
Estadístico F		3.706 sobre 8 y 76		
Valor p		0.001056		

Tabla 11.21: Coeficientes de ajuste de la demanda de refrigeración, lote 3, primer orden

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	204.2446	13.4757	15.16	0.0000
A	0.2623	3.3698	0.08	0.9383
B	18.6666	3.3698	5.54	0.0000
C	-7.0165	3.3698	-2.08	0.0438
D	-4.3451	3.3284	-1.31	0.1992
E	-0.8788	3.3698	-0.26	0.7956
F	-6.3301	3.3698	-1.88	0.0676
G	3.2272	3.3698	0.96	0.3440
H	3.7468	3.3698	1.11	0.2728
A:B	-2.5408	3.7675	-0.67	0.5039
A:C	-2.6955	3.7675	-0.72	0.4785
A:D	-1.8384	3.7675	-0.49	0.6282
A:E	0.0191	3.7675	0.01	0.9960
A:F	0.2160	3.7675	0.06	0.9546
A:G	-2.7875	3.7675	-0.74	0.4637
A:H	1.0092	3.7675	0.27	0.7902
B:C	4.4570	3.7675	1.18	0.2438
B:D	-0.5148	3.7675	-0.14	0.8920
B:E	-1.1023	3.7675	-0.29	0.7714
B:F	-3.5585	3.7675	-0.94	0.3506
B:G	7.7572	3.7675	2.06	0.0461
B:H	-3.0734	3.7675	-0.82	0.4195
C:D	2.1387	3.7675	0.57	0.5734
C:E	-0.0725	3.7675	-0.02	0.9847
C:F	0.4774	3.7675	0.13	0.8998
C:G	2.6389	3.7675	0.70	0.4877
C:H	-0.2008	3.7675	-0.05	0.9578
D:E	3.7460	3.7675	0.99	0.3261
D:F	0.5369	3.7675	0.14	0.8874
D:G	-3.3361	3.7675	-0.89	0.3812
D:H	-1.3757	3.7675	-0.37	0.7169
E:F	-2.5116	3.7675	-0.67	0.5088
E:G	-3.6439	3.7675	-0.97	0.3393
E:H	0.1533	3.7675	0.04	0.9677
F:G	0.7734	3.7675	0.21	0.8384
F:H	-0.0520	3.7675	-0.01	0.9891
G:H	-1.5825	3.7675	-0.42	0.6767
A^2	4.3018	3.0454	1.41	0.1655
B^2	18.2572	3.0454	6.00	0.0000
C^2	1.9050	3.0454	0.63	0.5352
D^2	2.6673	2.7281	0.98	0.3341
E^2	2.1469	3.0454	0.70	0.4849
F^2	8.6358	3.0454	2.84	0.0071
G^2	-6.4697	3.0454	-2.12	0.0399
H^2	0.5094	3.0454	0.17	0.8680
R <sup>2</sup> múltiple			0.7357	
R <sup>2</sup> ajustado			0.4451	
Estadístico F		2.53 sobre 44 y 40		
Valor p		0.001797		

Tabla 11.22: Coeficientes de ajuste de la demanda de refrigeración, lote 3, segundo orden



sólido en sus términos cuadráticos.

Nuevamente se ha procedido a mejorar el ajuste eliminando los elementos cuya influencia sea despreciable en la demanda de refrigeración. Se ha obtenido así el ajuste mejorado representado en la tabla 11.23.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	215.0500	5.9042	36.42	0.0000
A	0.2623	2.8264	0.09	0.9263
B	18.6666	2.8264	6.60	0.0000
C	-7.0165	2.8264	-2.48	0.0154
D	-4.3451	2.7917	-1.56	0.1240
F	-6.3301	2.8264	-2.24	0.0282
G	3.2272	2.8264	1.14	0.2573
H	3.7468	2.8264	1.33	0.1891
B:G	7.7572	3.1600	2.45	0.0165
A <sup>2</sup>	3.2555	2.3820	1.37	0.1760
B <sup>2</sup>	17.2108	2.3819	7.23	0.0000
F <sup>2</sup>	7.5895	2.3819	3.19	0.0021
G <sup>2</sup>	-7.5161	2.3819	-3.16	0.0023
R <sup>2</sup> múltiple		0.6654		
R <sup>2</sup> ajustado		0.6096		
Estadístico F		11.93 sobre 12 y 72		
Valor p		8.029e-13		

Tabla 11.23: Coeficientes de ajuste de la demanda de refrigeración, lote 3, mejorado

Igual que sucedía con la demanda de calefacción, se han mantenido elementos en el ajuste que podrían haber sido eliminados, por dos motivos. La variable G, conductividad de estado sólido, mantiene el término lineal porque su valor cuadrático sí resulta significativo. Por su parte, las variables A, D y H, intervalo de temperatura del cambio de fase, espesor y conductividad de estado líquido respectivamente, se mantienen porque su eliminación empeora los coeficientes y estadísticos de ajuste.

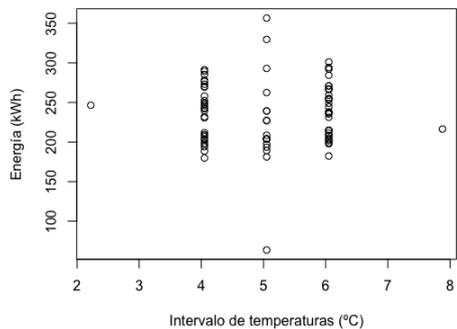
El ajuste mejorado presenta elementos de primer orden, un término cruzado entre las variables B y G, temperatura media de cambio de fase, y conductividad en estado sólido, y términos cuadráticos para el intervalo de cambio de fase A, la temperatura media de cambio de fase B, el calor específico F, y la conductividad de estado sólido. Para la demanda de refrigeración por lo tanto sí que parece que el PCM representa una aportación significativa, tal y como se demuestra por la aparición de variables relacionadas con el cambio de fase en el ajuste definitivo.

Se ha representado la demanda de refrigeración en función de cada una de las variables en la figura 11.17, para poder analizar de manera visual las interrelaciones que puedan existir.

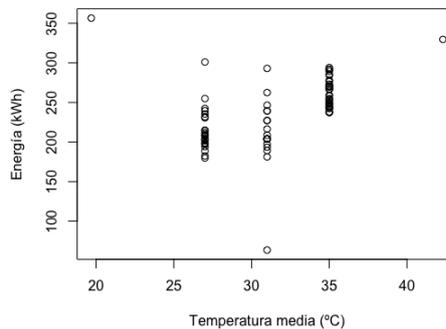
Tal y como se aprecia en estas imágenes, el intervalo de temperaturas de cambio de fase (figura 11.17a), y la conductividad de estado líquido (figura 11.17h) no presentan ninguna influencia notable en la demanda de refrigeración.

Respecto a la temperatura media de cambio de fase (figura 11.17b), se observa que los valores de la demanda para las temperaturas de 27 °C y 31 °C son notablemente menores que las demandas para 35 °C. En vista de que el modelo mejorado de la tabla 11.23 presenta un término cuadrático para esta variable (variable B), se puede concluir que la demanda de refrigeración presenta un mínimo entre las temperaturas de 27 °C y 31 °C.

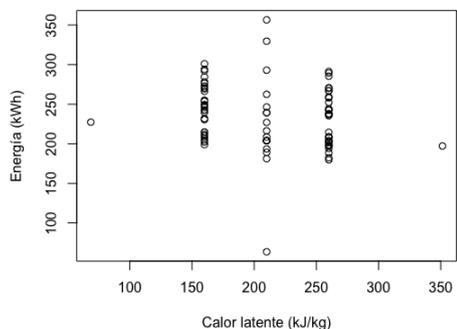
El calor latente de cambio de fase (figura 11.17c), presenta una clara tendencia a reducir



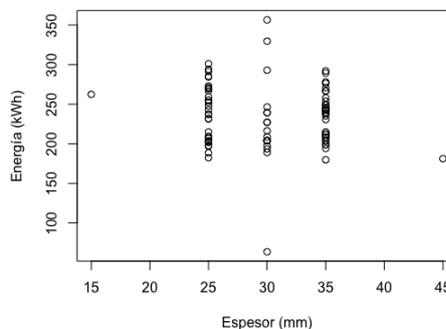
(a)



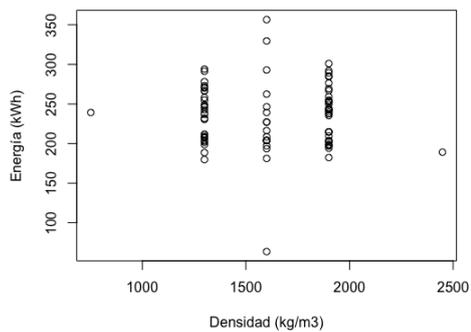
(b)



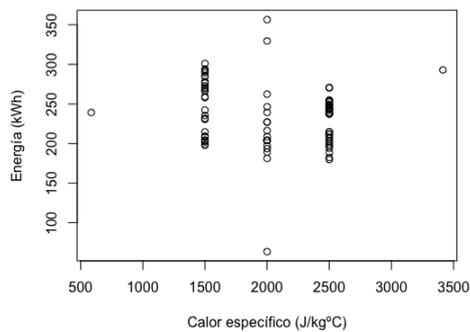
(c)



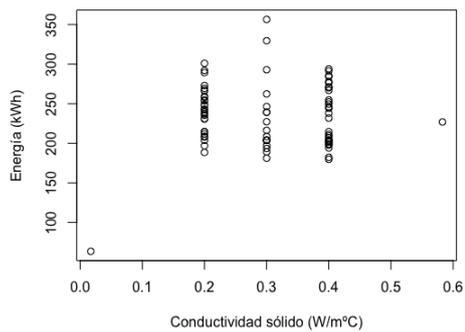
(d)



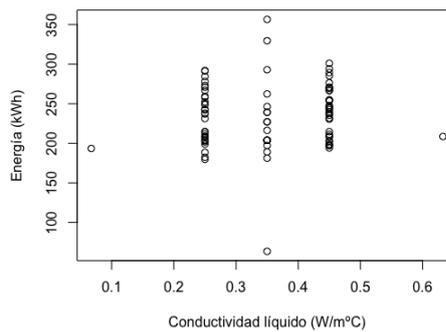
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 11.17: Evolución de la demanda de refrigeración con cada variable. Lote 3



la demanda de refrigeración cuando su valor aumenta. Posiblemente esto se deba a que un mayor calor latente supone una mayor capacidad de absorción de la radiación solar, manteniendo la temperatura del muro baja, lo que a su vez contribuye a una menor entrada de calor al interior del cubículo.

Para el resto de variables no relacionadas directamente con el cambio de fase, se observa una ligera tendencia a disminuir la demanda de refrigeración aumentando el espesor del PCM (figura 11.17d), pero más leve que con los parámetros analizados previamente. La densidad (figura 11.17e) no parece tener una influencia notable en la demanda, lo que coincide con la ausencia de esta variable en el modelo mejorado. Finalmente el calor específico (figura 11.17f) y la conductividad de estado sólido (figura 11.17g) presentan una reducción de la demanda al aumentar su valor. La conductividad de estado sólido presenta un comportamiento contrapuesto al que ha presentado con la demanda de acondicionamiento y la demanda de calefacción. En este caso el papel de la conductividad no es aumentar la capacidad de aislamiento como para los parámetros anteriores, sino facilitar la transmisión de calor en el interior del material de cambio de fase, para acelerar su fusión.

En las figuras 11.18 y 11.19 se han representado las relaciones entre cada par de variables que forman parte del ajuste, para poder analizar en mayor profundidad las interrelaciones que se dan entre variables. Los valores para las variables no representadas se han asignado al valor medio para las simulaciones del lote 3, que se representan en la tabla 11.24.

$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (kJ/kg)	L (m)
5.05	31	210	0.03
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)	$k_{liq}$ (W/m·K)
1600	2000	0.3	0.35

Tabla 11.24: Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.18

El intervalo de temperaturas del cambio de fase se representa en las figuras 11.18a a 11.18f. Su influencia en la demanda de refrigeración es muy baja, tal y como se muestra por la escasa variación del valor final. De todos, modos, la presencia de un término cuadrático para el intervalo de temperaturas se hace patente con la presencia de valores mínimos de la demanda con intervalos de temperatura de alrededor de 5 °C, tal y como se aprecia en la figuras 11.18a, 11.18b o 11.18d. Con estos resultados, se puede concluir que para un PCM en el exterior, es preferible que este no sea un material puro, con un cambio de fase isoterma, sino que presente un intervalo de cambio de fase.

La temperatura media de cambio de fase se presenta en las figuras 11.18a y 11.18g a 11.18k. Presenta valores mínimos para una temperatura media de cambio de fase de en torno a 29 °C. El término cruzado con la conductividad en estado sólido se puede visualizar en la figura 11.18j, donde aparece un punto de silla. Tal y como se aprecia, la conductividad de estado sólido modifica la temperatura de cambio óptima, siendo el valor óptimo menor cuando aumenta la conductividad de estado sólido. De esta forma, modificando la conductividad de la

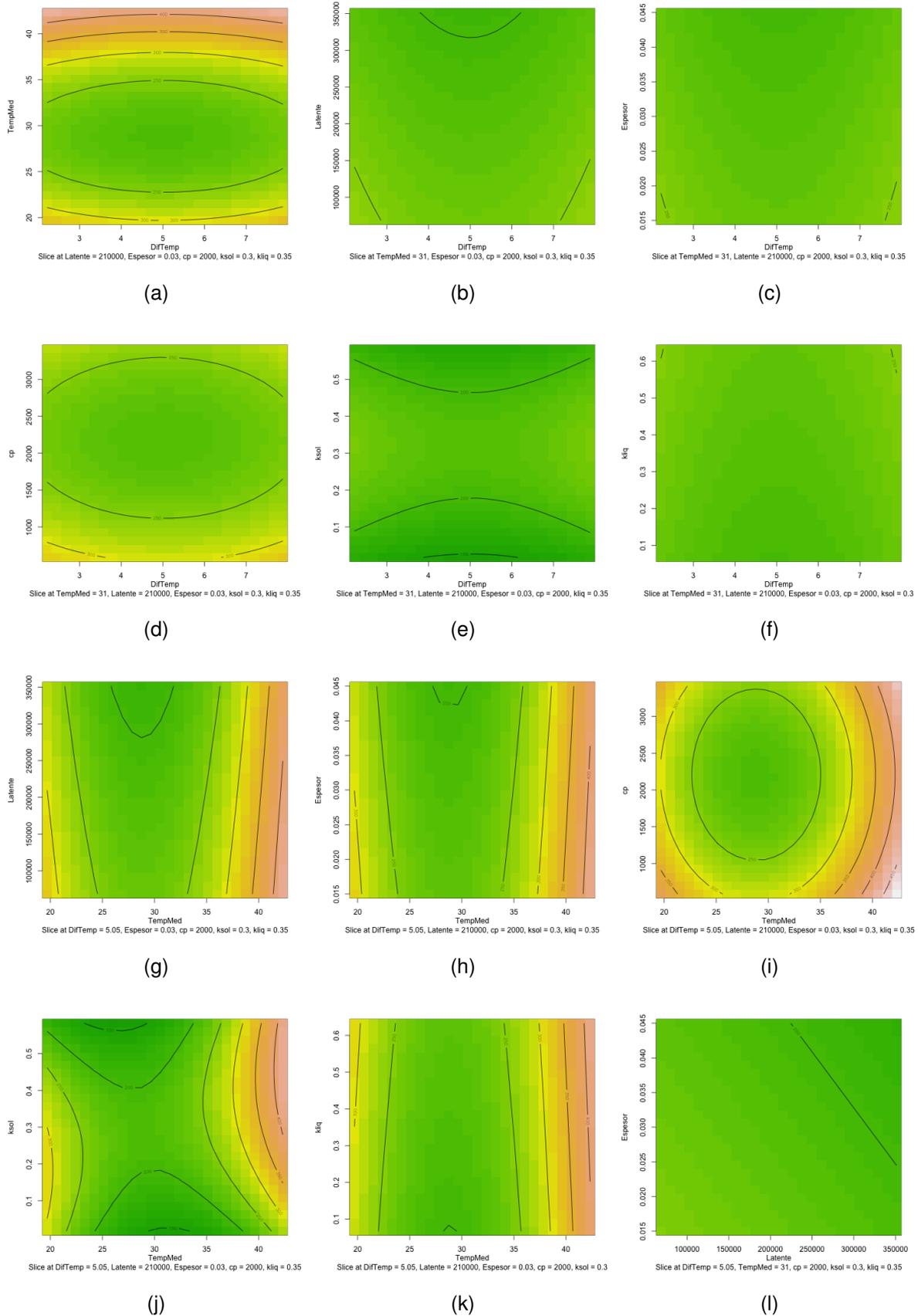


Figura 11.18: Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de refrigeración, lote 3

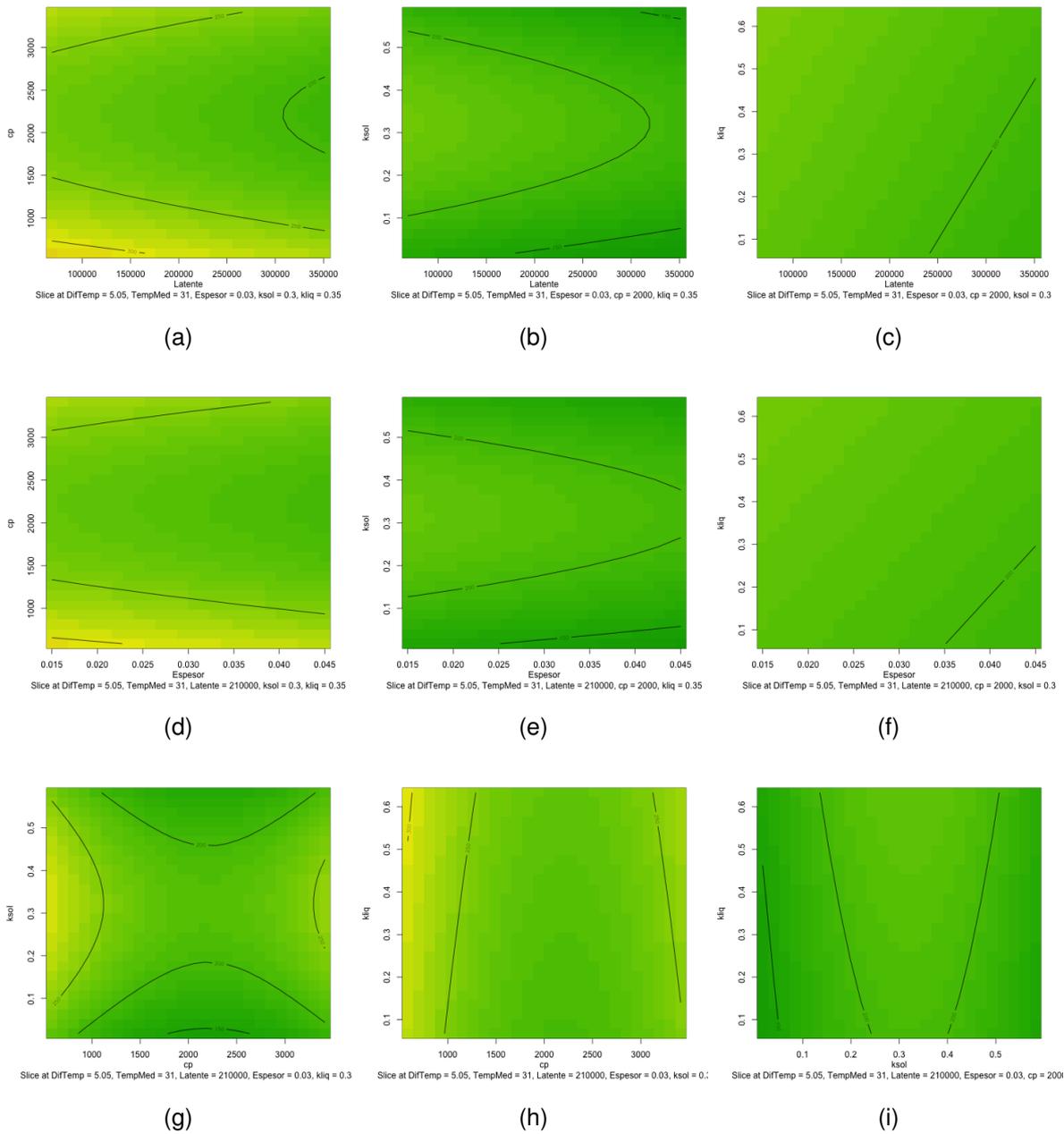


Figura 11.19: Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de refrigeración, lote 3. Continuación

capa de PCM se puede ajustar el material más adecuado, en función de su temperatura media de cambio de fase.

El calor latente se representa en las figuras 11.18b, 11.18g y 11.18l a 11.19c. En todas las figuras se puede observar que aumentar el calor latente de cambio de fase reduce la demanda de refrigeración, pero sin presentar un mínimo matemático en la zona de análisis, que coincide con los valores habituales de los PCMs.

El espesor se representa en las figuras 11.18c, 11.18h, 11.18l y 11.19d a 11.19f. De forma similar a lo que ocurre con el calor latente, al aumentar el espesor de la capa del material de cambio de fase, disminuye la demanda de refrigeración.

El calor específico se presenta en las figuras 11.18d, 11.18i, 11.19a, 11.19d, 11.19g y 11.19h, en las que se puede observar un valor óptimo que minimiza la demanda de refrigeración. Este valor se encuentra en torno a 2200 J/kg·K. Este mínimo se puede apreciar levemente en la figura (figura 11.17f), pero no es muy evidente. La representación de su interrelación con el resto de variables ha permitido descubrir este valor óptimo.

La conductividad de estado sólido se presenta en las figuras 11.18e, 11.18j, 11.19b, 11.19e, 11.19g y 11.19i. Además del comportamiento que ya se ha comentado respecto a su interrelación con la temperatura media de cambio de fase, la conductividad de estado sólido presenta valores de demanda de refrigeración altos para sus valores medios, disminuyendo la demanda tanto al aumentar como al disminuir la conductividad, sin presentar mínimos matemáticos en la zona de simulación. La conductividad para la que se maximiza la demanda de refrigeración se encuentra en torno a 0.3 W/m·K.

Finalmente, la conductividad de estado líquido se presenta en las figuras 11.18f, 11.18k, 11.19c, 11.19f, 11.19h y 11.19i. Se observa una influencia pequeña en la demanda de refrigeración, tal y como se anticipa en el análisis del ajuste, pero se observa una tendencia clara a disminuir la demanda de refrigeración al disminuir la conductividad de estado líquido.

Como se puede observar, y al contrario de lo que sucedía para la demanda de calefacción, el material de cambio de fase sí que aporta a la disminución de la demanda de refrigeración, presentando un comportamiento óptimo con una temperatura media de cambio de fase en torno a 29 °C, que se puede variar en función de la conductividad de estado sólido, un intervalo de cambio de fase de 5 °C, y un calor latente lo más elevado posible. Además, alejar la conductividad de estado sólido del valor 0.3 W/m·K, y un calor efectivo lo más cercano posible a 2200 J/kg·K también aportan a reducir la demanda de refrigeración.

Teniendo en cuenta que en la demanda de calefacción los materiales de cambio de fase no presentan apenas influencia, los efectos relacionados con el PCM encontrados para la demanda total de acondicionamiento, se deben principalmente a la aportación en la demanda de refrigeración.

#### 11.2.3.4. PCM exterior. Exergía de acondicionamiento

El análisis del resultado de la exergía de las simulaciones, se representa de manera comparativa en el diagrama de caja de la figura 11.20, donde se representan todos los lotes de

simulaciones realizadas. Como se puede observar en el diagrama de caja, al comparar los dos

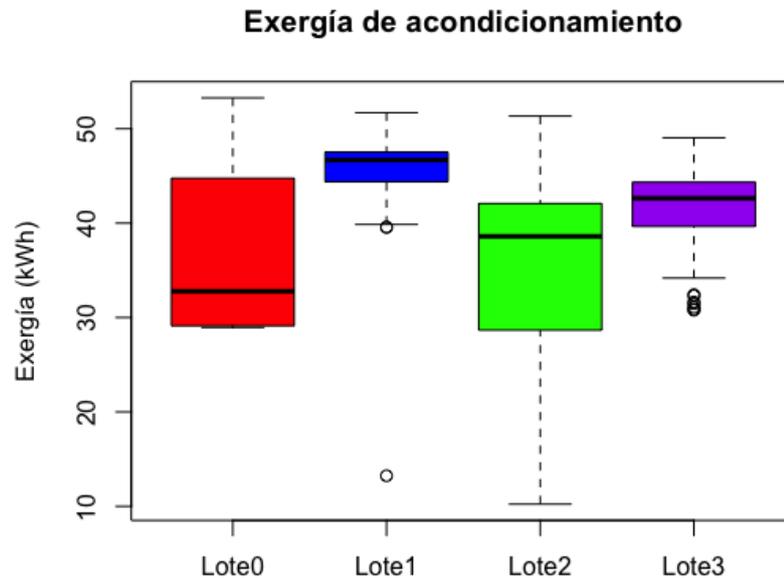


Figura 11.20: Diagrama de caja para la exergía de acondicionamiento, con el lote 3

lotes de simulaciones con el PCM por el exterior, los lotes 1 y 3, es el lote 3 el que presenta mejor comportamiento en la reducción de la demanda de exergía para el acondicionamiento, con lo que se demuestra una vez más la mejor adecuación de temperaturas de cambio de fase en torno a 30 °C en la que se ha centrado el lote 3 de simulaciones. Sin embargo, la configuración con el PCM por el exterior presenta a priori peor comportamiento que la colocación del PCM por el interior. Incluso al comparar la configuración con el muro sin PCM, la colocación del PCM por el exterior apenas es comparable con las peores configuraciones del muro sin PCM.

La exergía de acondicionamiento para este lote 3 varía entre un máximo de 49 kWh para la simulación 73, y un mínimo de en torno a 31 kWh para las simulaciones 5, 20 y 49. Los valores de las variables para estas simulaciones se han representado en la tabla 11.25 Como se puede

ID	$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (J/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)	$k_{liq}$ (W/m·K)
5	6.05	35.00	160000.00	0.04	1900.00	2500.00	0.20	0.45
20	4.05	35.00	260000.00	0.04	1900.00	2500.00	0.20	0.25
49	4.05	27.00	160000.00	0.04	1900.00	2500.00	0.20	0.45

Tabla 11.25: Propiedades de simulación para los valores mínimos de la exergía de acondicionamiento

observar de los valores de las variables, la exergía mínima se consigue con valores altos para el espesor, la densidad y el calor específico, y valores bajos para la conductividad de estado sólido. Además las corridas axiales de las simulaciones, en las que sólo una de las variables

adopta valores máximos, no presentan una reducción tan notable de la exergía, con lo que se puede deducir que es la interacción entre las cuatro variables las que presenta una sinergia que hace disminuir la exergía de acondicionamiento. Los valores bajos de las simulaciones 5 y 20 también se daban para el caso de la demanda de calefacción.

Las tablas 11.26 y 11.27 representan los valores de ajuste para la exergía de acondicionamiento, de primer y segundo orden.

Como se puede observar, los indicadores de ajuste para ambos casos son excepcionalmente buenos, con un ajuste ligeramente mejor para el segundo orden.

En el ajuste de primer orden, las variables relacionadas con el cambio de fase no presentan ninguna influencia en la exergía de acondicionamiento. Tanto el intervalo de temperatura de cambio de fase, como la temperatura media o el calor latente (variables A, B y C respectivamente), presentan valores de  $Pr(>|t|)$  bastante elevados. La conductividad de estado líquido (variable H), tampoco presenta influencia en el resultado final, como ha sucedido en el resto de parámetros analizados para la configuración con el PCM por el exterior.

Sin embargo, en el ajuste de segundo orden, las variables relacionadas con el cambio de fase presentan alguna influencia en la demanda de exergía. En concreto, se presenta un término cruzado entre la temperatura media de cambio de fase y el calor específico (variables B y F). Además, los términos de segundo orden del intervalo de temperatura y la temperatura media de cambio de fase se encuentran en el límite de aceptación.

Se procede por lo tanto a mejorar el ajuste, eliminando los elementos de menor significación, para analizar con mayor detalle la influencia de cada variable. Se presenta el ajuste mejorado en la tabla 11.28.

Como se puede observar por los coeficientes de ajuste presentados, aparecen varios términos cruzados, además términos cuadráticos para el calor efectivo (variable F) y la conductividad de estado sólido (variable G).

Se ha representado la demanda de refrigeración en función de cada una de las variables en la figura 11.21, para poder analizar de manera visual las interrelaciones que puedan existir. Tal y como se predice de los coeficientes de ajuste del modelo mejorado (tabla 11.28), ni el intervalo de temperaturas de cambio de fase, ni la temperatura media, ni el calor latente, ni la conductividad de estado líquido parecen influir en la exergía de acondicionamiento. Respecto al resto de variables, las tendencias son bastante claras, disminuyendo la exergía de acondicionamiento al aumentar los valores del espesor, la densidad, y el calor específico, y disminuir la conductividad de estado sólido.

Se ha representado también la interrelación por pares de variables en la figura 11.22. Para los valores no representados en cada una de las subfiguras, se han usado los valores de la tabla 11.29.

La temperatura media de cambio de fase tiene una influencia baja en la exergía de acondicionamiento, tal y como se puede observar en las figuras 11.22a a 11.22d. El único elemento significativo es la interrelación entre temperatura media de cambio de fase y el calor específico, tal y como se aprecia en la figura 11.22c. En esa imagen se observa que para valores

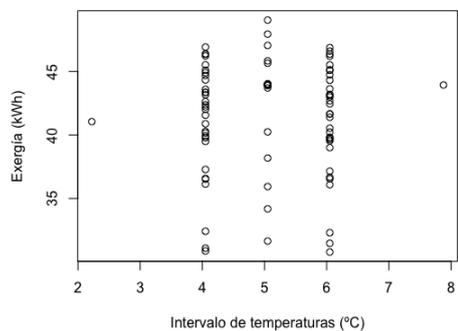


	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	41.4740	0.2058	201.56	0.0000
A	0.0677	0.2121	0.32	0.7505
B	0.0389	0.2121	0.18	0.8551
C	0.0771	0.2121	0.36	0.7172
D	-2.3555	0.2095	-11.24	0.0000
E	-1.1583	0.2121	-5.46	0.0000
F	-1.0379	0.2121	-4.89	0.0000
G	2.9172	0.2121	13.75	0.0000
H	-0.0431	0.2121	-0.20	0.8394
R <sup>2</sup> múltiple		0.8295		
R <sup>2</sup> ajustado		0.8115		
Estadístico F		46.21 sobre 8 y 76		
Valor p		< 2.2e-16		

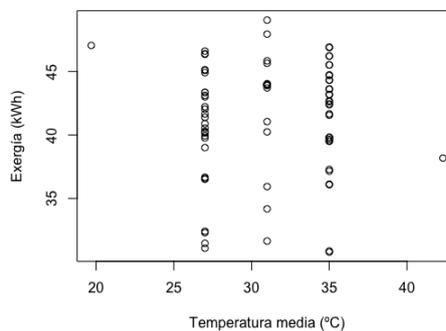
Tabla 11.26: Coeficientes de ajuste de la exergía de acondicionamiento, lote 3, primer orden

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	43.8960	0.7241	60.62	0.0000
A	0.0677	0.1811	0.37	0.7105
B	0.0389	0.1811	0.21	0.8311
C	0.0771	0.1811	0.43	0.6724
D	-2.3555	0.1788	-13.17	0.0000
E	-1.1583	0.1811	-6.40	0.0000
F	-1.0379	0.1811	-5.73	0.0000
G	2.9172	0.1811	16.11	0.0000
H	-0.0431	0.1811	-0.24	0.8129
A:B	0.0411	0.2024	0.20	0.8403
A:C	0.0001	0.2024	0.00	0.9994
A:D	0.0175	0.2024	0.09	0.9315
A:E	0.0019	0.2024	0.01	0.9924
A:F	0.0227	0.2024	0.11	0.9114
A:G	0.0296	0.2024	0.15	0.8846
A:H	-0.1675	0.2024	-0.83	0.4129
B:C	-0.0531	0.2024	-0.26	0.7943
B:D	0.2150	0.2024	1.06	0.2945
B:E	0.1698	0.2024	0.84	0.4065
B:F	-0.6856	0.2024	-3.39	0.0016
B:G	-0.2290	0.2024	-1.13	0.2647
B:H	0.0409	0.2024	0.20	0.8411
C:D	-0.0213	0.2024	-0.11	0.9167
C:E	0.0004	0.2024	0.00	0.9983
C:F	-0.0061	0.2024	-0.03	0.9761
C:G	-0.0293	0.2024	-0.14	0.8855
C:H	0.0323	0.2024	0.16	0.8739
D:E	-0.4691	0.2024	-2.32	0.0257
D:F	-0.3085	0.2024	-1.52	0.1354
D:G	0.6678	0.2024	3.30	0.0020
D:H	0.0152	0.2024	0.08	0.9404
E:F	-0.2307	0.2024	-1.14	0.2612
E:G	0.3238	0.2024	1.60	0.1176
E:H	-0.0149	0.2024	-0.07	0.9417
F:G	0.1738	0.2024	0.86	0.3956
F:H	-0.0042	0.2024	-0.02	0.9837
G:H	0.0201	0.2024	0.10	0.9215
A^2	-0.2988	0.1636	-1.83	0.0753
B^2	-0.2835	0.1636	-1.73	0.0909
C^2	-0.1285	0.1636	-0.79	0.4368
D^2	-0.2536	0.1466	-1.73	0.0914
E^2	-0.2303	0.1636	-1.41	0.1671
F^2	-0.6212	0.1636	-3.80	0.0005
G^2	-0.6364	0.1636	-3.89	0.0004
H^2	-0.1147	0.1636	-0.70	0.4876
R <sup>2</sup> múltiple		0.9346		
R <sup>2</sup> ajustado		0.8626		
Estadístico F		12.99 sobre 44 y 40		
Valor p		1.435e-13		

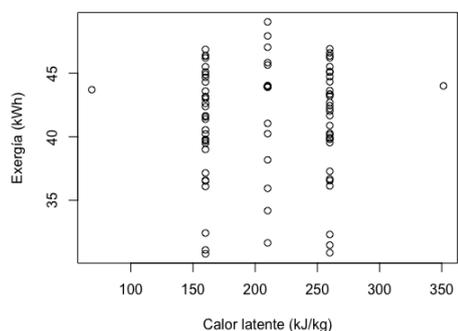
Tabla 11.27: Coeficientes de ajuste de la exergía de acondicionamiento, lote 3, segundo orden



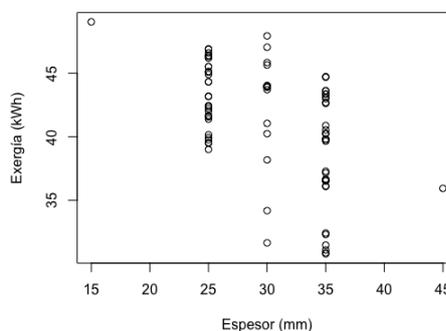
(a)



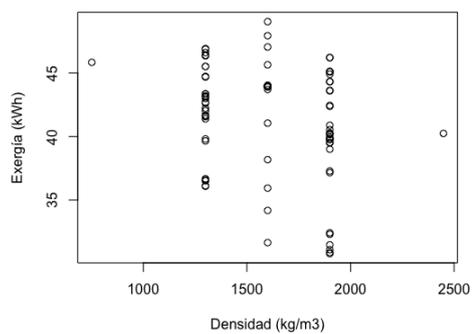
(b)



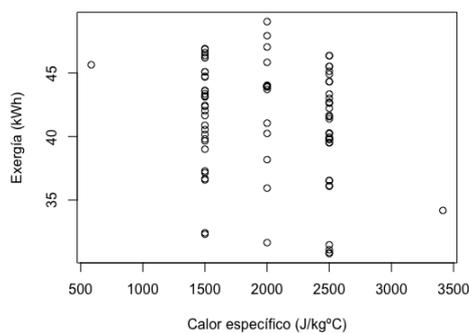
(c)



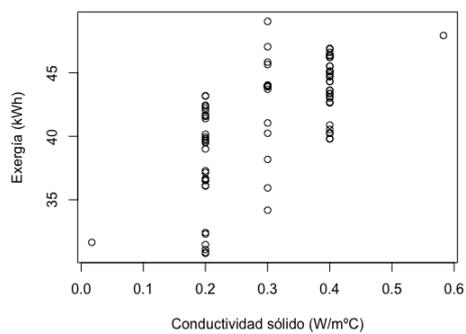
(d)



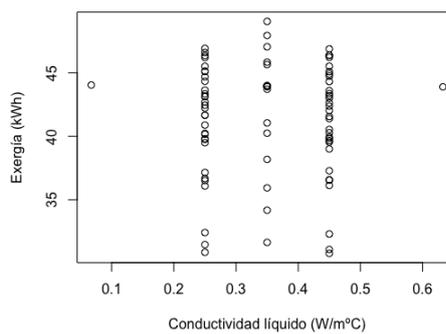
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 11.21: Evolución de la exergía de acondicionamiento con cada variable. Lote 3

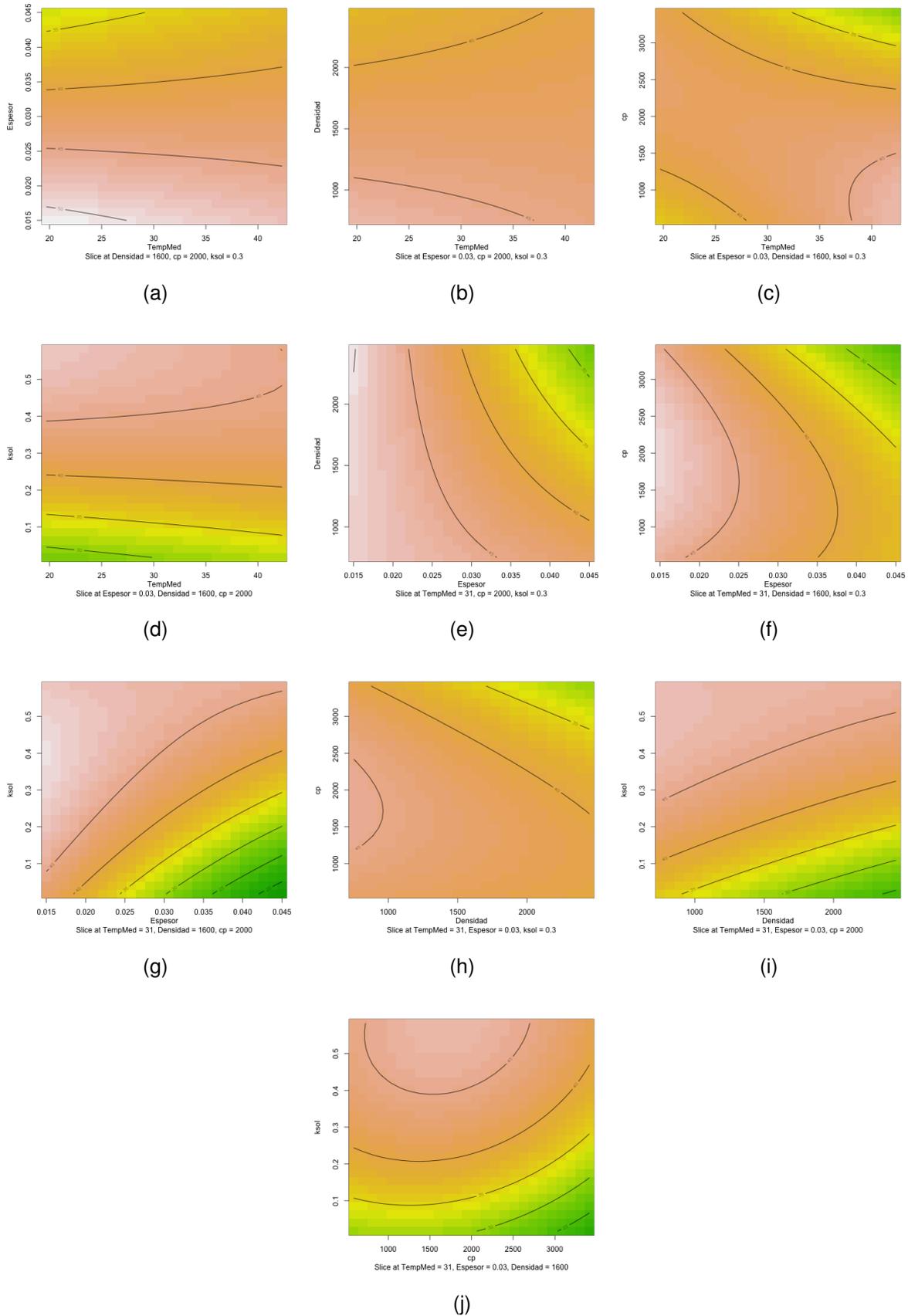


Figura 11.22: Relación entre las variables del modelo mejorado para la exergía de acondicionamiento, lote 3

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	42.3851	0.2319	182.79	0.0000
B	0.0389	0.1534	0.25	0.8007
D	-2.3555	0.1515	-15.55	0.0000
E	-1.1583	0.1534	-7.55	0.0000
F	-1.0379	0.1534	-6.77	0.0000
G	2.9172	0.1534	19.02	0.0000
B:D	0.2150	0.1715	1.25	0.2142
B:E	0.1698	0.1715	0.99	0.3255
B:F	-0.6856	0.1715	-4.00	0.0002
B:G	-0.2290	0.1715	-1.34	0.1862
D:E	-0.4691	0.1715	-2.74	0.0080
D:F	-0.3085	0.1715	-1.80	0.0765
D:G	0.6678	0.1715	3.89	0.0002
E:F	-0.2307	0.1715	-1.35	0.1830
E:G	0.3238	0.1715	1.89	0.0634
F:G	0.1738	0.1715	1.01	0.3143
F~2	-0.4764	0.1276	-3.73	0.0004
G~2	-0.4916	0.1276	-3.85	0.0003
R <sup>2</sup> múltiple		0.9214		
R <sup>2</sup> ajustado		0.9014		
Estadístico F		46.19 sobre 17 y 67		
Valor p		< 2.2e-16		

Tabla 11.28: Coeficientes de ajuste de la exergía de acondicionamiento, lote 3, mejorado

$T_m$ (°C)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)
31	0.03	1600	2000	0.3

Tabla 11.29: Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.22

del calor específico elevados, aumentar la temperatura media de cambio de fase reduce de manera significativa la exergía de acondicionamiento. De todos modos, esa zona de elevada temperatura media y calor específico es sólo una extrapolación basada en pocos datos, por lo que se ha decidido analizar también el lote 1, en el que se han realizado simulaciones con mayor temperatura media de cambio de fase.

Se ha decidido representar la demanda exergética en función de la temperatura media de cambio de fase, para los dos lotes 1 y 3, de forma que se cubra mayor rango de temperaturas. La figura 11.23 representa esa relación, con los datos del lote 1 en color verde, y los del lote 3 en color azul. Tal y como se puede apreciar, los valores menores de exergía de acondicionamiento se dan para la zona media del lote 3, para temperaturas entre 27 °C y 35 °C. Por lo tanto la tendencia que se apreciaba en la figura 11.22c no es más que un artificio del ajuste realizado sobre los datos experimentales del lote 3.

Con respecto al resto de variables, estas siguen las tendencias habituales en la transferencia de calor convencional, disminuyendo la exergía de acondicionamiento al aumentar el espesor, la densidad y el calor específico, y al disminuir la conductividad de estado sólido.

Hay que destacar que en la zona de análisis tampoco se ha encontrado un valor de las variables que provoque un mínimo matemático, igual que sucedía con la demanda de energía de acondicionamiento.

### 11.2.3.5. PCM exterior. Transmitancia exergética

El último parámetro que se quiere analizar en la configuración de PCM por el exterior es la transmitancia exergética. Tal y como se explico en el apartado 11.1.3, se trata de una extensión

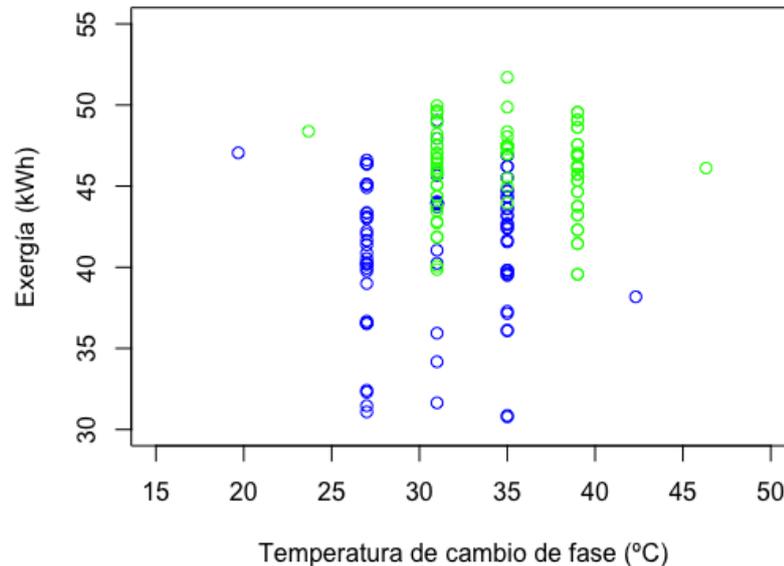


Figura 11.23: Exergía de acondicionamiento en relación a la temperatura media de cambio de fase, para los lotes 1 y 3

de la transmitancia térmica convencional, que en lugar de relacionar las propiedades del muro con la transferencia de calor, relaciona las propiedades con la transferencia de exergía a través del cerramiento.

En el diagrama de caja de la figura 11.24 se ha representado el resultado de las simulaciones sobre cada uno de los lotes, para la transmitancia exergética. Tal y como se puede apreciar, nuevamente el lote 3 presenta mejor comportamiento que el lote 1, por una mejor elección de los valores asignados a las variables. Además, las configuraciones con el PCM en el exterior presentan peor comportamiento que la colocación del PCM en el interior. Las configuraciones sin PCM presentan también mejor comportamiento general que el cerramiento con PCM por el exterior, aunque el lote 3 presenta un comportamiento parejo a las peores configuraciones que los cerramientos sin PCM.

La transmitancia exergética para el lote 3 con el PCM por el exterior varía entre un máximo de  $0.037 \text{ W/m}^2\text{K}$  para la simulación 73, y un mínimo de  $0.018$  para las simulaciones 5, 20 y 49, que son las mismas que presentaban máximos y mínimos para la exergía de acondicionamiento. Se pueden ver los valores de las variables para transmitancia mínima en la tabla 11.25, en la página 230.

Igual que para la exergía de acondicionamiento, la transmitancia mínima se consigue con valores altos para el espesor, la densidad y el calor específico, y valores bajos para la conductividad de estado sólido. Además las corridas axiales de las simulaciones, en las que sólo una de las variables adopta valores máximos, no presentan una reducción tan notable de la transmitancia, con lo que se puede deducir que es la interacción entre las cuatro variables las

### Transmitancia exergética

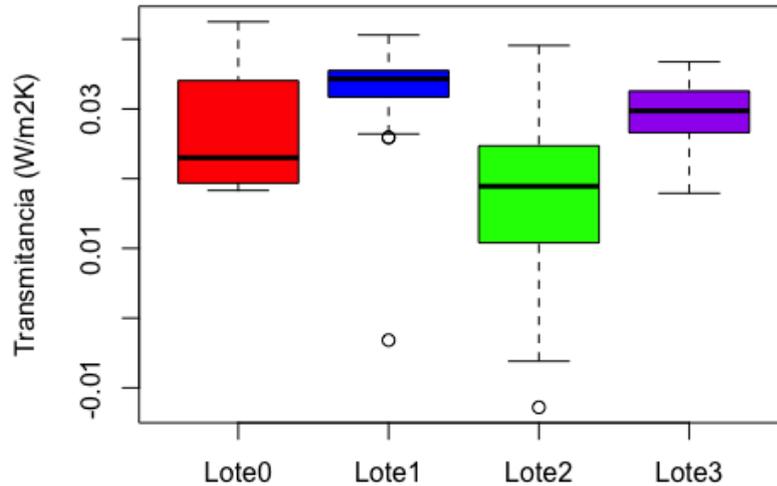


Figura 11.24: Diagrama de caja para la transmitancia exergética, con el lote 3

que presenta una sinergia que hace disminuir la transmitancia exergética. Los valores bajos de las simulaciones 5 y 20 también se daban para el caso de la demanda de calefacción.

Las tablas 11.30 y 11.31 presentan respectivamente el resultado de los ajustes de primer y segundo orden sobre los valores de la transmitancia exergética para el lote 3, que es el que presenta mejor comportamiento.

Tal y como se puede observar de los coeficientes de ajuste  $R^2$ , el estadístico  $F$  y el valor  $p$ , ambos ajustes presentan muy buen comportamiento, siendo el ajuste de segundo orden sensiblemente mejor que el de primer orden.

Analizando los resultados del ajuste de primer orden de la tabla 11.30, se puede observar que ninguna de las tres variables relacionadas con el cambio de fase presenta una influencia significativa, debido a su alto valor del parámetro  $\Pr(>|t|)$ , al igual que sucede con la conductividad de estado líquido. El calor latente de cambio de fase (variable C) es la que presenta algo más de influencia, pero sigue estando fuera de los valores de aceptación.

Por su parte, analizando los resultados del ajuste de segundo orden de la tabla 11.31, los términos lineales presentan un comportamiento similar al ajuste de primer orden, aunque el calor latente presenta algo más de significatividad. Aparece además un término cruzado entre la temperatura media de cambio de fase y el calor específico (B:F) que ha venido apareciendo en varios de los ajustes, y elementos cruzados adicionales para el espesor, con la densidad (D:E) y con la conductividad de estado sólido (D:G). Además de esto, aparecen términos cuadráticos para dos variables no contempladas por el ajuste de primer orden, como son el intervalo de cambio de fase y la temperatura media de cambio de fase (variables A y B).



	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.0290	0.0002	118.74	0.0000
A	-0.0000	0.0003	-0.09	0.9297
B	-0.0002	0.0003	-0.88	0.3812
C	0.0003	0.0003	1.33	0.1873
D	-0.0023	0.0002	-9.25	0.0000
E	-0.0012	0.0003	-4.66	0.0000
F	-0.0010	0.0003	-3.97	0.0002
G	0.0030	0.0003	11.84	0.0000
H	-0.0002	0.0003	-0.85	0.3969
R <sup>2</sup> múltiple			0.7782	
R <sup>2</sup> ajustado			0.7548	
Estadístico F			33.32 sobre 8 y 76	
Valor p			< 2.2e-16	

Tabla 11.30: Coeficientes de ajuste para la transmitancia exergética del lote 3, de primer orden

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.0325	0.0008	38.86	0.0000
A	-0.0000	0.0002	-0.11	0.9158
B	-0.0002	0.0002	-1.06	0.2961
C	0.0003	0.0002	1.60	0.1176
D	-0.0023	0.0002	-11.12	0.0000
E	-0.0012	0.0002	-5.61	0.0000
F	-0.0010	0.0002	-4.77	0.0000
G	0.0030	0.0002	14.24	0.0000
H	-0.0002	0.0002	-1.02	0.3119
A:B	0.0002	0.0002	0.81	0.4222
A:C	0.0000	0.0002	0.18	0.8606
A:D	0.0001	0.0002	0.39	0.7022
A:E	0.0000	0.0002	0.14	0.8895
A:F	0.0000	0.0002	0.03	0.9800
A:G	0.0001	0.0002	0.47	0.6383
A:H	-0.0002	0.0002	-0.74	0.4637
B:C	-0.0002	0.0002	-1.03	0.3073
B:D	-0.0000	0.0002	-0.06	0.9531
B:E	-0.0000	0.0002	-0.01	0.9959
B:F	-0.0007	0.0002	-2.84	0.0070
B:G	-0.0003	0.0002	-1.48	0.1472
B:H	0.0002	0.0002	0.77	0.4441
C:D	-0.0001	0.0002	-0.38	0.7054
C:E	-0.0000	0.0002	-0.13	0.9009
C:F	-0.0000	0.0002	-0.06	0.9516
C:G	-0.0001	0.0002	-0.51	0.6141
C:H	0.0001	0.0002	0.32	0.7471
D:E	-0.0005	0.0002	-2.33	0.0250
D:F	-0.0002	0.0002	-0.91	0.3685
D:G	0.0006	0.0002	2.64	0.0117
D:H	0.0001	0.0002	0.29	0.7719
E:F	-0.0001	0.0002	-0.33	0.7399
E:G	0.0004	0.0002	1.58	0.1224
E:H	-0.0000	0.0002	-0.00	0.9990
F:G	0.0000	0.0002	0.14	0.8923
F:H	-0.0000	0.0002	-0.11	0.9124
G:H	0.0001	0.0002	0.24	0.8108
A^2	-0.0005	0.0002	-2.60	0.0131
B^2	-0.0009	0.0002	-4.78	0.0000
C^2	-0.0002	0.0002	-1.15	0.2574
D^2	-0.0003	0.0002	-1.77	0.0838
E^2	-0.0003	0.0002	-1.52	0.1357
F^2	-0.0009	0.0002	-4.50	0.0001
G^2	-0.0006	0.0002	-2.99	0.0048
H^2	-0.0001	0.0002	-0.74	0.4664
R <sup>2</sup> múltiple			0.9192	
R <sup>2</sup> ajustado			0.8303	
Estadístico F			10.34 sobre 44 y 40	
Valor p			7.09e-12	

Tabla 11.31: Coeficientes de ajuste para la transmitancia exergética del lote 3, de segundo orden

Se han eliminado aquellos elementos que presentan menor significatividad, para mejorar el ajuste, y facilitar el análisis de las interrelaciones entre variables. Se ha obtenido así el ajuste mejorado que se presenta en la tabla 11.32. Al eliminar los elementos de menor significatividad,

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.0318	0.0005	61.93	0.0000
A	-0.0000	0.0002	-0.12	0.9035
B	-0.0002	0.0002	-1.21	0.2304
C	0.0003	0.0002	1.83	0.0721
D	-0.0023	0.0002	-12.72	0.0000
E	-0.0012	0.0002	-6.42	0.0000
F	-0.0010	0.0002	-5.46	0.0000
G	0.0030	0.0002	16.29	0.0000
B:D	-0.0000	0.0002	-0.07	0.9462
B:E	-0.0000	0.0002	-0.01	0.9953
B:F	-0.0007	0.0002	-3.25	0.0019
B:G	-0.0003	0.0002	-1.69	0.0959
D:E	-0.0005	0.0002	-2.67	0.0098
D:F	-0.0002	0.0002	-1.04	0.3020
D:G	0.0006	0.0002	3.02	0.0037
E:F	-0.0001	0.0002	-0.38	0.7034
E:G	0.0004	0.0002	1.81	0.0758
F:G	0.0000	0.0002	0.16	0.8766
A^2	-0.0004	0.0002	-2.69	0.0093
B^2	-0.0008	0.0002	-5.30	0.0000
D^2	-0.0002	0.0001	-1.69	0.0962
E^2	-0.0002	0.0002	-1.40	0.1677
F^2	-0.0008	0.0002	-4.97	0.0000
G^2	-0.0005	0.0002	-3.15	0.0025
R <sup>2</sup> múltiple		0.9059		
R <sup>2</sup> ajustado		0.8704		
Estadístico F		25.53 sobre 23 y 61		
Valor p		< 2.2e-16		

Tabla 11.32: Coeficientes de ajuste para la transmitancia exergética del lote 3, mejorado

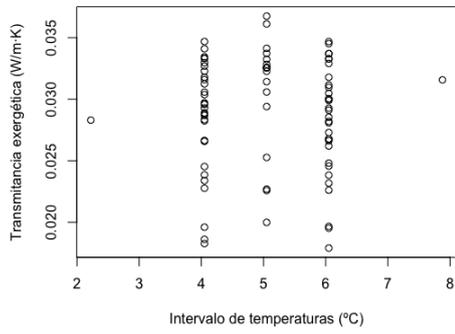
se ha conseguido mejorar sobre todo el valor de  $R^2$  ajustado, el estadístico  $F$  y el valor  $p$ .

Para comenzar el análisis de las relaciones de la transmitancia exergética con cada variable, se han representado una a una en la figura 11.25. Tal y como se puede observar, ni el intervalo de temperaturas de cambio de fase (figura 11.25a), ni el calor latente (figura 11.25c), ni la conductividad de estado líquido (figura 11.25h) presentan ninguna influencia sobre la transmitancia exergética. La temperatura media de cambio de fase (figura 11.25b) no parece tampoco presentar una influencia notable, aunque se aprecia en los dos valores extremos una comportamiento no simétrico como con el resto de variables. Analizando los coeficientes del ajuste mejorado (tabla 11.32), aparece un término cuadrático para la variable B, junto con algún término cruzado con otras variables, que puede representar un comportamiento más complejo que se analizará a continuación.

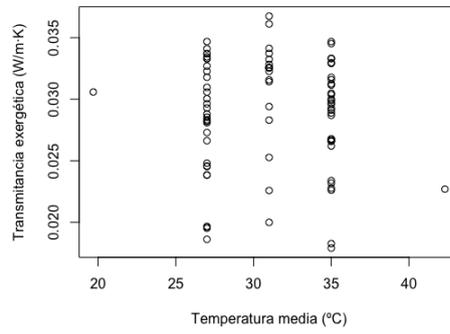
Del resto de variables, estas siguen la tendencia ya analizada con antelación, disminuyendo la transmitancia al aumentar el espesor (figura 11.25d), la densidad (figura 11.25e), y el calor específico (figura 11.25f), y al disminuir la conductividad de estado sólido (figura 11.25g).

Debido a la aparición de términos cuadrados y cruzados, se procede a representar gráficamente la interrelación entre cada par de variables, para poder analizar la influencia de cada con más detalle. Se han representado estos gráficos en las figuras 11.26 y 11.27. Para los valores no representados, se han usado los valores presentes en la tabla 11.33.

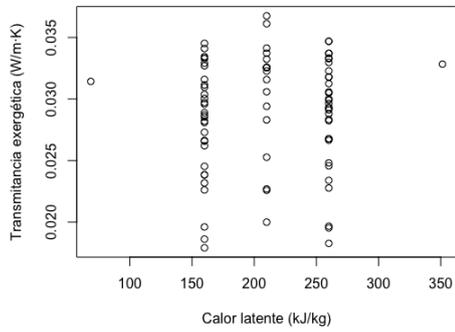
El primer resultado visible es que para la transmitancia exergética, en lugar de aparecer mínimos matemáticos como sería deseable, aparecen varios máximos en la zona de análisis. Estos resultados difieren en forma de los obtenidos para la exergía de acondicionamiento



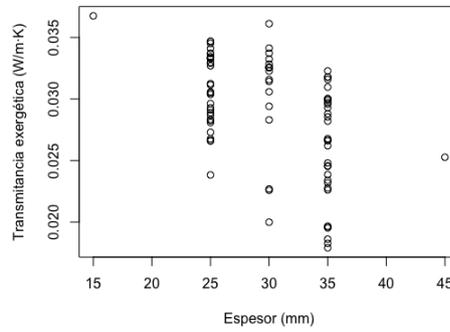
(a)



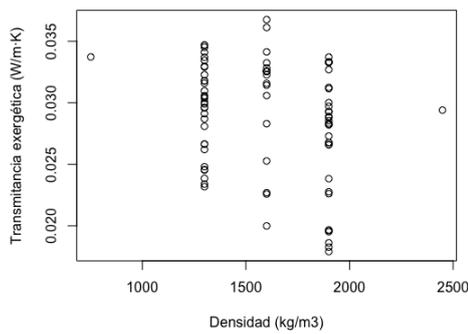
(b)



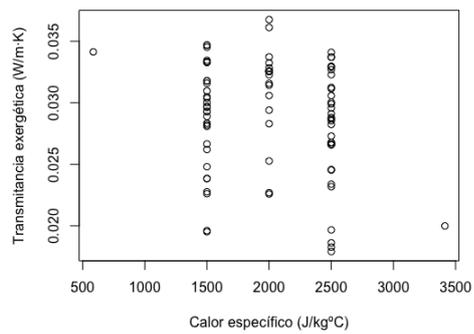
(c)



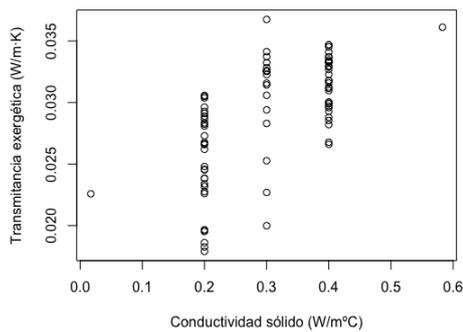
(d)



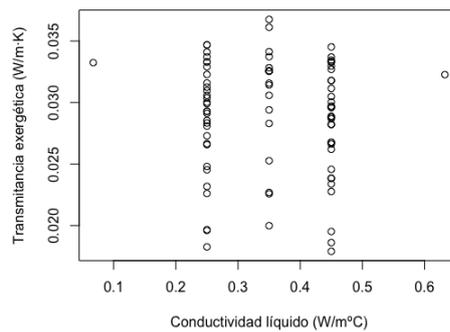
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 11.25: Evolución de la transmitancia exergética con cada variable. Lote 3

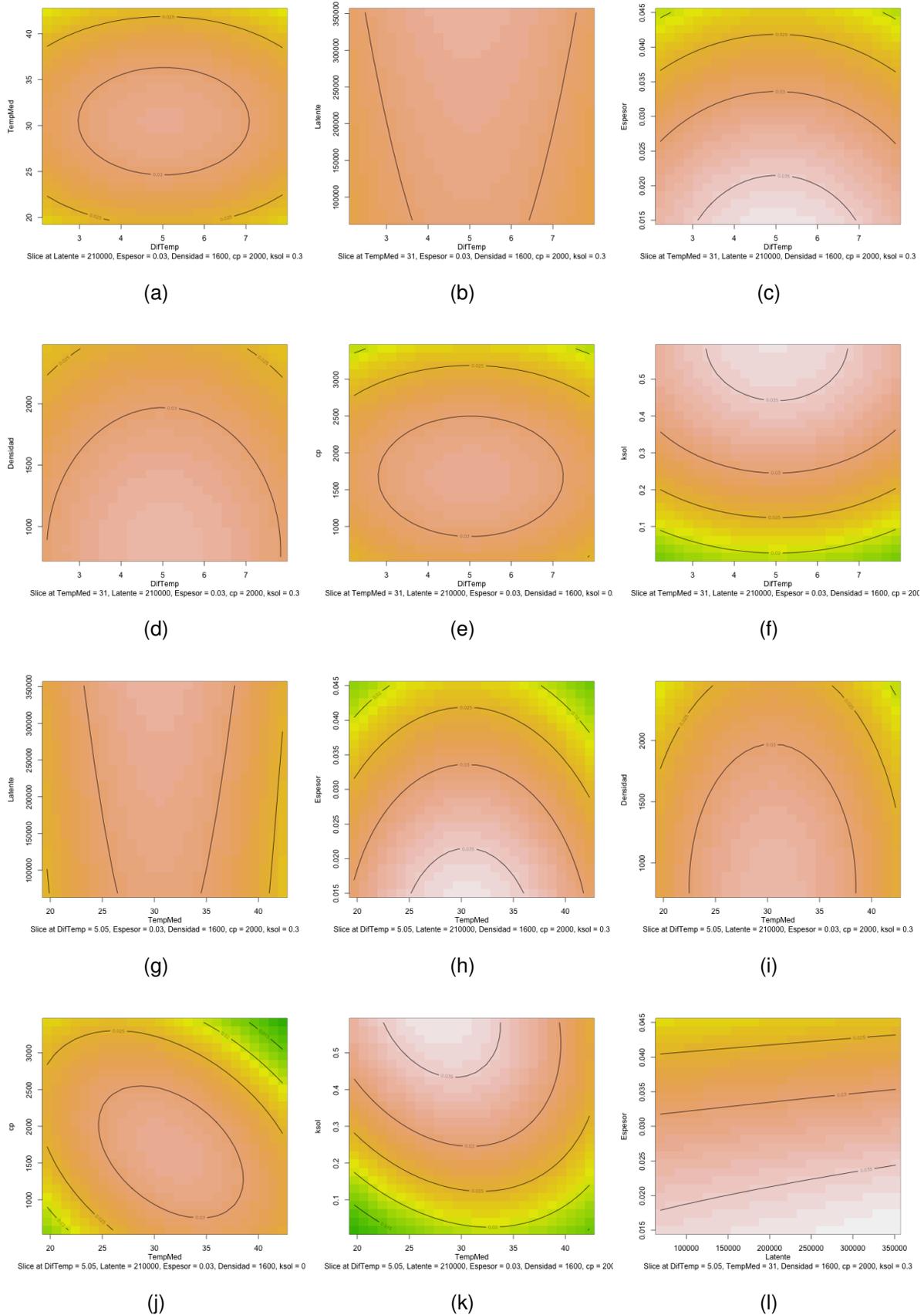


Figura 11.26: Relación entre las variables del modelo mejorado para la transmitancia exérgica, lote 3



$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (kJ/kg)	L (m)
5.05	31	210	0.03
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	cp (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)	$k_{liq}$ (W/m·K)
1600	2000	0.3	0.35

Tabla 11.33: Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.26 y 11.27

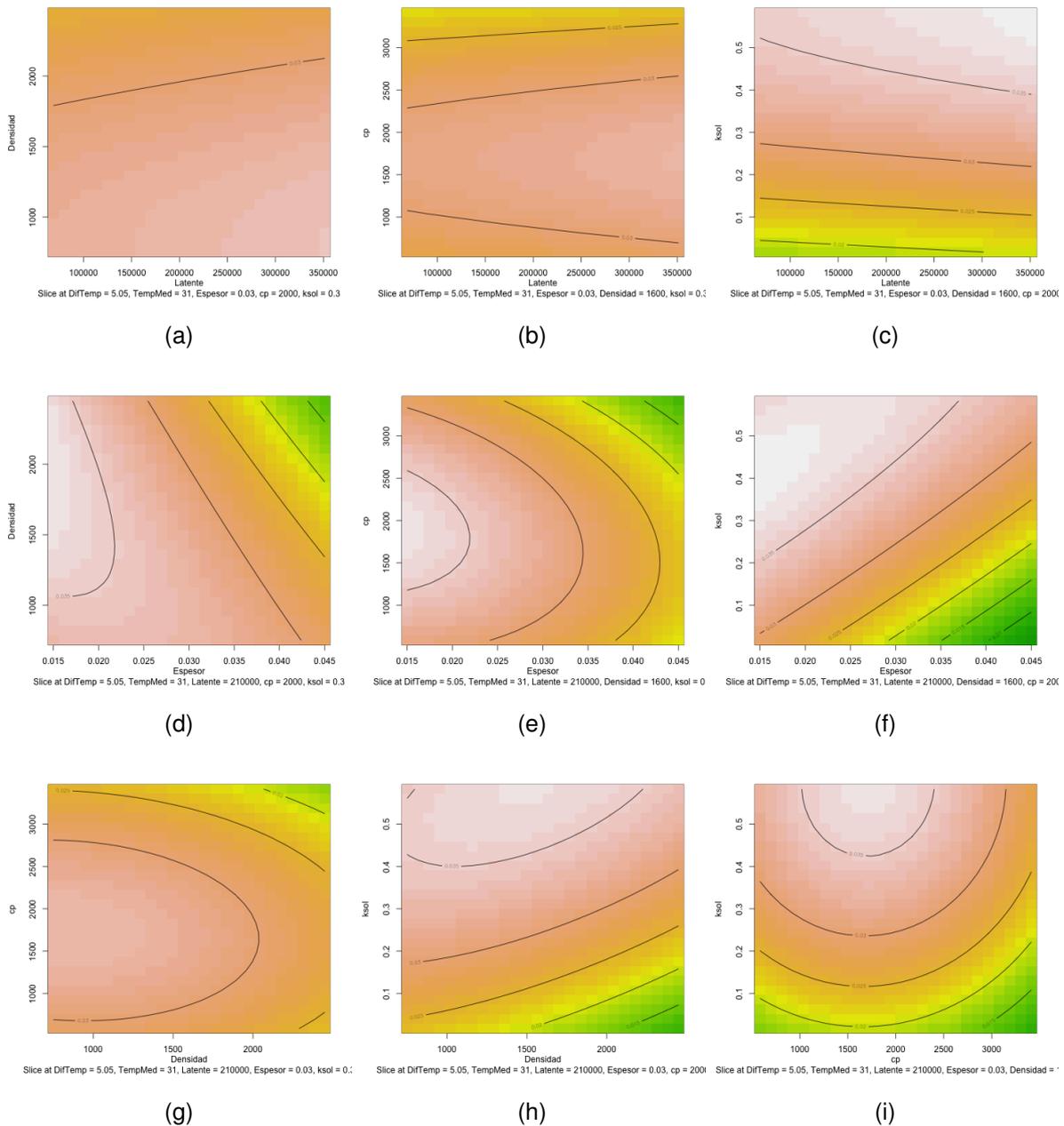


Figura 11.27: Relación entre las variables del modelo mejorado para la transmitancia exergética, lote 3. Continuación

analizados en el apartado anterior, aunque las conclusiones que se alcanzan son similares.

Analizando el efecto del intervalo de temperaturas de cambio de fase, representado en las figuras 11.26a a 11.26f, la influencia de dicho intervalo es bastante pequeña, provocando variaciones pequeñas de la transmitancia exergética. Parece darse una tendencia a disminuir la transmitancia exergética al disminuir el intervalo de cambio de fase, algo que es congruente con la literatura revisada, pero también al aumentar dicho intervalo de temperatura, encontrándose valores máximos para el valor medio de las simulaciones, que es de 5.05 °C. De todos modos, la variación que esto supone es muy débil, con lo que no reviste mayor interés.

La temperatura media de cambio de fase se representa en las figuras 11.26a y 11.26g a 11.26k. Esta variable presenta una relación más clara con respecto a la transmitancia exergética que el intervalo de cambio de fase. Lo curioso de la temperatura media de cambio de fase es que obtiene el valor máximo de transmitancia en torno al valor medio de la temperatura de cambio de fase. Resulta extraño que para el mismo valor de cambio que minimiza la demanda de refrigeración, se maximice la transmitancia exergética. Esta desviación puede ser debida a la baja significatividad que presenta el término lineal para la temperatura media de cambio de fase, variable B. Para aclarar mejor este aspecto, se ha decidido representar la transmitancia exergética en función de la temperatura de cambio de fase, en la figura 11.28, para los dos lotes con el PCM por el exterior. Se ha representado el lote 1 en color verde, y el lote 3 en

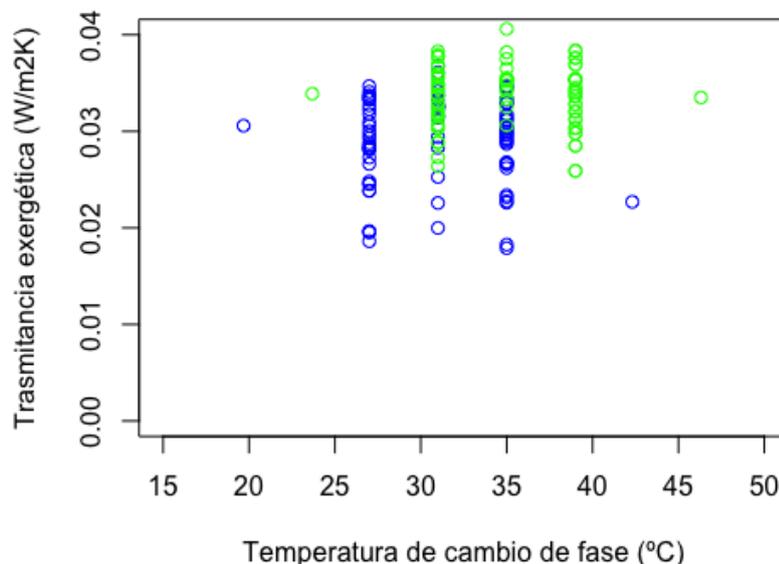


Figura 11.28: Transmitancia exergética en relación a la temperatura media de cambio de fase, para los lotes 1 y 3

color azul. Como se puede observar, para el lote 1, con simulaciones a mayores temperaturas de cambio de fase, la transmitancia exergética presenta en general valores más elevados. El resultado observado parece por lo tanto un problema de ajuste que no debería ser tomado en



consideración, y como se ha comentado, provendrá probablemente de un mal ajuste para esta variable en concreto.

Con respecto al resto de variables, estas siguen las tendencias habituales en la transferencia de calor convencional, disminuyendo la exergía de acondicionamiento al aumentar el espesor, la densidad y el calor específico, y al disminuir la conductividad de estado sólido.

Hay que destacar que en la zona de análisis tampoco se ha encontrado un valor de las variables que provoque un mínimo matemático, igual que sucedía con la demanda de energía de acondicionamiento. Sí se presentan varios máximos que maximizan el valor de la transmitancia exergética dentro de los rangos de análisis, al contrario de lo que sucede con la demanda de refrigeración. La demanda de refrigeración y la transmitancia exergética parecen seguir por lo tanto direcciones opuestas en sus tendencias.

### 11.2.3.6. PCM interior. Energía de acondicionamiento

Además de la configuración con el PCM por el exterior, se han ensayado también configuraciones con el PCM por el interior, en el lote 2. La energía total de acondicionamiento, o demanda de acondicionamiento, varía entre un máximo de 1315 kWh para la simulación 46, y un mínimo de 342 kWh para la simulación 79. Esta simulación presenta un valor mínimo para el intervalo de temperaturas de cambio de fase. La segunda demanda mínima se corresponde con la simulación 83, con una demanda total de 378 kWh, que se corresponde precisamente con el máximo intervalo de temperaturas de cambio de fase. Los valores de las variables para estas dos simulaciones se presentan en la tabla 11.34. Parece por lo tanto que con las propie-

ID	$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (J/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)	$k_{liq}$ (W/m·K)
79	2.22	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
83	7.88	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350

Tabla 11.34: Propiedades de simulación para los valores mínimos de la demanda de acondicionamiento

dades medias ensayadas, el intervalo de temperaturas de cambio de fase presenta una gran importancia a la hora de disminuir la demanda total de energía para el acondicionamiento del cubículo.

La tabla 11.35 presenta los coeficientes de ajuste del modelo de primer orden para la demanda de acondicionamiento del lote 2, con el PCM situado en el interior del cubículo. La tabla 11.36 representa los coeficientes para el ajuste del modelo de segundo orden.

Como se puede apreciar en la parte inferior de la tabla 11.35, el modelo de primer orden presenta un mal ajuste, con valores bajos en ambos coeficientes  $R^2$ , tanto el múltiple como, el ajustado. Sin embargo, el modelo de segundo orden, representado en la tabla 11.36 presenta un ajuste notablemente mejor, y será por lo tanto el empleado en el análisis.

En el modelo de segundo orden inicial, no presentan ninguna influencia en la demanda de energía de acondicionamiento las variables codificadas A, C, G y H, que se corresponden con el intervalo de cambio de fase, el calor latente, y las conductividades de estado sólido y

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	863.8626	22.0668	39.15	0.0000
A	-21.8135	22.7459	-0.96	0.3406
B	90.7188	22.7459	3.99	0.0002
C	-3.8986	22.7459	-0.17	0.8644
D	-65.4054	22.4668	-2.91	0.0047
E	-38.0982	22.7459	-1.67	0.0981
F	-54.0574	22.7459	-2.38	0.0200
G	11.2883	22.7459	0.50	0.6211
H	3.1728	22.7459	0.14	0.8894
R <sup>2</sup> múltiple			0.3094	
R <sup>2</sup> ajustado			0.2367	
Estadístico F			4.256 sobre 8 y 76	
Valor p			0.0002924	

Tabla 11.35: Coeficientes de ajuste para la energía de acondicionamiento del lote 2, de primer orden

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	671.0548	64.0053	10.48	0.0000
A	-21.8135	16.0054	-1.36	0.1805
B	90.7188	16.0054	5.67	0.0000
C	-3.8986	16.0054	-0.24	0.8088
D	-65.4054	15.8090	-4.14	0.0002
E	-38.0982	16.0054	-2.38	0.0222
F	-54.0574	16.0054	-3.38	0.0016
G	11.2883	16.0054	0.71	0.4847
H	3.1728	16.0054	0.20	0.8439
A:B	8.6208	17.8945	0.48	0.6326
A:C	8.7726	17.8945	0.49	0.6266
A:D	3.4685	17.8945	0.19	0.8473
A:E	14.4743	17.8945	0.81	0.4234
A:F	-3.1147	17.8945	-0.17	0.8627
A:G	-5.1746	17.8945	-0.29	0.7739
A:H	-27.1255	17.8945	-1.52	0.1374
B:C	-6.8142	17.8945	-0.38	0.7054
B:D	-76.9224	17.8945	-4.30	0.0001
B:E	-63.0706	17.8945	-3.52	0.0011
B:F	-59.7054	17.8945	-3.34	0.0018
B:G	26.2392	17.8945	1.47	0.1504
B:H	-2.9146	17.8945	-0.16	0.8714
C:D	10.1254	17.8945	0.57	0.5747
C:E	4.1094	17.8945	0.23	0.8195
C:F	1.9615	17.8945	0.11	0.9133
C:G	-3.4705	17.8945	-0.19	0.8472
C:H	-0.4763	17.8945	-0.03	0.9789
D:E	-14.5771	17.8945	-0.81	0.4201
D:F	-30.2903	17.8945	-1.69	0.0983
D:G	0.6892	17.8945	0.04	0.9695
D:H	9.4679	17.8945	0.53	0.5997
E:F	-23.0334	17.8945	-1.29	0.2054
E:G	5.1831	17.8945	0.29	0.7736
E:H	-2.7471	17.8945	-0.15	0.8788
F:G	-1.2403	17.8945	-0.07	0.9451
F:H	-18.2421	17.8945	-1.02	0.3141
G:H	-6.4784	17.8945	-0.36	0.7192
A^2	-27.4939	14.4646	-1.90	0.0646
B^2	71.0781	14.4646	4.91	0.0000
C^2	59.1961	14.4646	4.09	0.0002
D^2	39.4614	12.9575	3.05	0.0041
E^2	42.3808	14.4646	2.93	0.0056
F^2	7.0850	14.4646	0.49	0.6269
G^2	1.0935	14.4646	0.08	0.9401
H^2	11.0708	14.4646	0.77	0.4485
R <sup>2</sup> múltiple			0.8200	
R <sup>2</sup> ajustado			0.6221	
Estadístico F			4.142 sobre 44 y 40	
Valor p			6.745e-06	

Tabla 11.36: Coeficientes de ajuste para la energía de acondicionamiento del lote 2, de segundo orden



líquido. Tanto Peippo [201], como Stovall y Tomlinson [202] y Neeper [203], ya habían señalado la escasa influencia de la conductividad en el comportamiento global de un cerramiento con PCM en el interior. Sin embargo Neeper [203] sí que detecta relación con el intervalo de cambio de fase, y propone que intervalos menores presentan mejor comportamiento que los mayores. Pero en el ajuste aquí presentado, parece que el intervalo de cambio de fase no tiene una gran influencia a priori en el comportamiento térmico, lo que resulta extraño teniendo en cuenta que los valores mínimos de la demanda coinciden con los valores extremos del intervalo de cambio de fase, tal y como se acaba de exponer. La probabilidad de rechazo  $Pr(>|t|)$  no es demasiado elevada para el término lineal de esta variable (variable A), y tal vez al mejorar el ajuste gane importancia suficiente como para ser tenido en cuenta. Finalmente, la variable C, que se corresponde con el calor latente de cambio de fase, sólo aparece en su término cuadrático. El término cuadrático de la variable A, el intervalo de temperatura de cambio de fase, se encuentra también dentro del margen de aceptación habitual, por debajo del 10%.

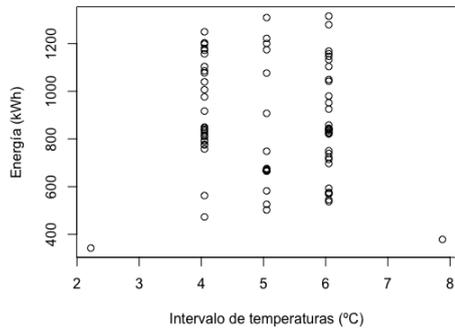
Se ha procedido a eliminar secuencialmente las variables y elementos que menor influencia presentan para mejorar el ajuste del modelo. El modelo final obtenido se representa en la tabla 11.37. Se observa que en este nuevo modelo los coeficientes de ajuste han mejorado, especialmente el coeficiente  $R^2$  ajustado, el estadístico  $F$  y el valor  $p$ .

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	703.4790	37.0071	19.01	0.0000
A	-21.8135	15.3985	-1.42	0.1610
B	90.7188	15.3985	5.89	0.0000
C	-3.8986	15.3985	-0.25	0.8009
D	-65.4054	15.2096	-4.30	0.0001
E	-38.0982	15.3985	-2.47	0.0158
F	-54.0574	15.3985	-3.51	0.0008
B:D	-76.9224	17.2161	-4.47	0.0000
B:E	-63.0706	17.2161	-3.66	0.0005
D:E	-14.5771	17.2161	-0.85	0.4000
A <sup>2</sup>	-30.5691	13.1100	-2.33	0.0226
B <sup>2</sup>	68.0029	13.1100	5.19	0.0000
C <sup>2</sup>	56.1209	13.1100	4.28	0.0001
D <sup>2</sup>	36.6314	11.7027	3.13	0.0025
E <sup>2</sup>	39.3057	13.1100	3.00	0.0038
R <sup>2</sup> múltiple			0.7085	
R <sup>2</sup> ajustado			0.6502	
Estadístico F			12.15 sobre 14 y 70	
Valor p			1.118e-13	

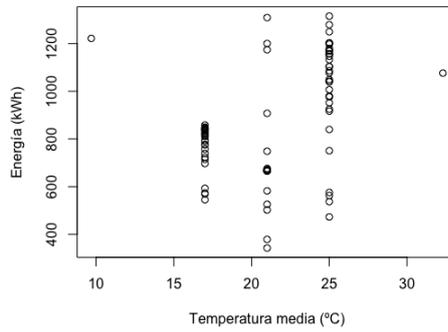
Tabla 11.37: Coeficientes de ajuste mejorados para la demanda de acondicionamiento, lote 2

Al ir retirando una a una las variables, hay términos que han ganado importancia en el ajuste. Así, los términos lineales del intervalo de temperatura de cambio de fase, variable A, y el calor latente, variable C, han mejorado sólo ligeramente, pero sus valores cuadráticos han mejorado su probabilidad de aceptación, sobre todo en el caso del término  $A^2$ , que ha aumentado el nivel de aceptación superando incluso el 5%. Se mantienen también los términos cruzados de las variables B, D y E, temperatura media de cambio de fase, espesor y densidad.

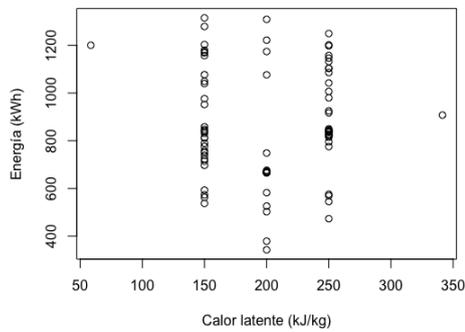
Para analizar en mayor profundidad la relación de cada variable con la demanda total de acondicionamiento, se ha representado una a una en los gráficos de la figura 11.29. En estas imágenes, es evidente que salvo para el caso del intervalo de temperaturas (figura 11.29a), para el resto de variables los valores mínimos se obtienen en la zona central de la simulación. Para estas variables, en algunas se aprecia una ligera tendencia a mejorar la demanda al



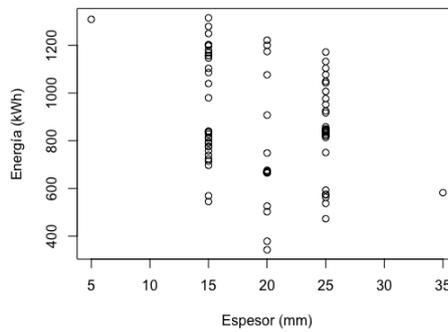
(a)



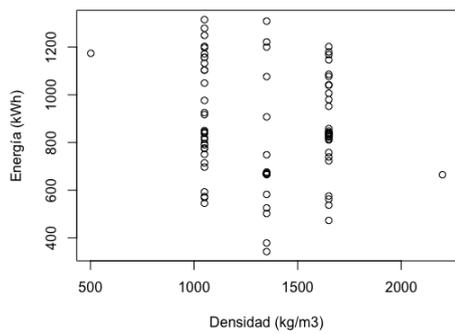
(b)



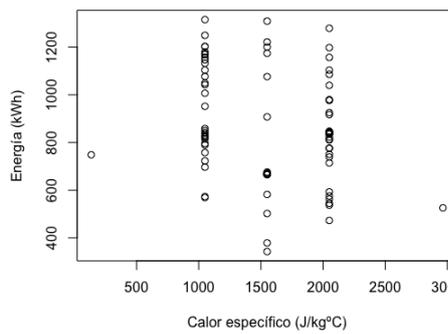
(c)



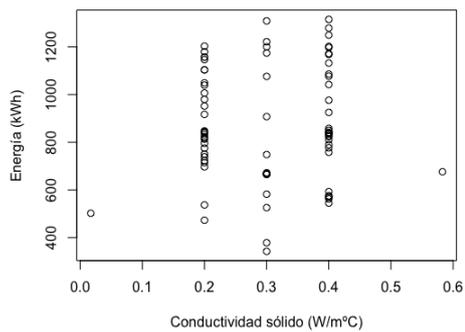
(d)



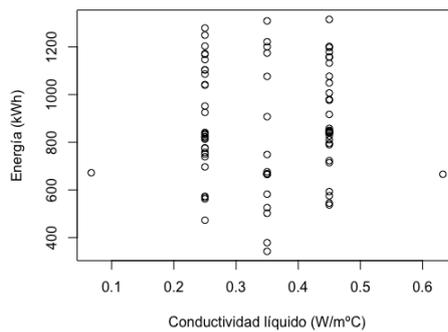
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 11.29: Evolución demanda de acondicionamiento con cada variable. Lote 2



reducir los valores de las variables, como es el caso de ambas conductividades (figuras 11.29g y 11.29h), mientras que en otras se produce el efecto contrario, con una ligera reducción de la demanda al aumentar el valor de las variables, como parece suceder con el calor latente (figura 11.29c), el espesor (figura 11.29d), la densidad (figura 11.29e), y el calor específico (figura 11.29f). La temperatura media de cambio de fase presenta un comportamiento complejo (figura 11.29b), con una gran dispersión en los resultados para la temperatura de 25 °C, y una menor dispersión para la temperatura de 17 °C.

De todos modos, estas tendencias que se observan son ligeras, y demuestran la complejidad de las interrelaciones entre variables que se dan para esta configuración. La relación entre las distintas variables presenta términos cruzados entre variables, y términos cuadráticos. Esta relación se ha representado gráficamente en las figuras 11.30 y 11.31 para cada par de variables. Las variables no representadas en cada figura están calculadas en los valores de la tabla 11.38.

$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (J/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)
4.69	16.24	201736.7	0.0177	1182.34	1550.00

Tabla 11.38: Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.30 y 11.31

Las figuras 11.30a a 11.30e representan la relación entre el intervalo de temperaturas del cambio de fase y el resto de variables. Como se puede apreciar, esta variable presenta un punto de silla en los valores prefijados respecto a las variables temperatura media, calor latente, espesor y densidad. Con respecto al calor específico, la figura 11.30e presenta también una cordillera ascendente en la demanda de energía, al disminuir el valor del calor específico. En relación con todas las variables, se puede apreciar que disminuir el intervalo de temperaturas de cambio de fase puede reducir la demanda de energía, tal y como propone Neeper [203], pero también parece que se consigue el mismo efecto aumentando el intervalo de cambio de fase. De hecho, Neeper en el artículo citado parece comprobar tan sólo intervalos de temperatura de cambio de fase de hasta 4°C, mientras que en este análisis parece que la mejora se empieza a notar a partir de 6°C de intervalo de cambio de fase.

En la figura 11.29a se ha representado la demanda de acondicionamiento en función del intervalo de temperatura de cambio de fase. Los dos valores extremos se corresponden con las corridas axiales son las que presentan los valores menores de demanda de acondicionamiento. Mirando el resto de términos, muestran una tendencia a la bajada de la demanda según disminuye el intervalo de cambio de fase. Se puede concluir por lo tanto que una disminución del intervalo de cambio de fase provoca una disminución de la demanda de acondicionamiento, pero quedaría por analizar si sucede lo mismo al aumentar el intervalo, o el valor obtenido se corresponde únicamente con una conjunción de variables singular.

Con respecto a la temperatura media de cambio de fase, los autores analizados coinciden en que dicha temperatura debería estar en torno a la temperatura media del interior del cubículo, cuando la capa de PCM no recibe directamente la radiación solar. La figura 11.32 representa

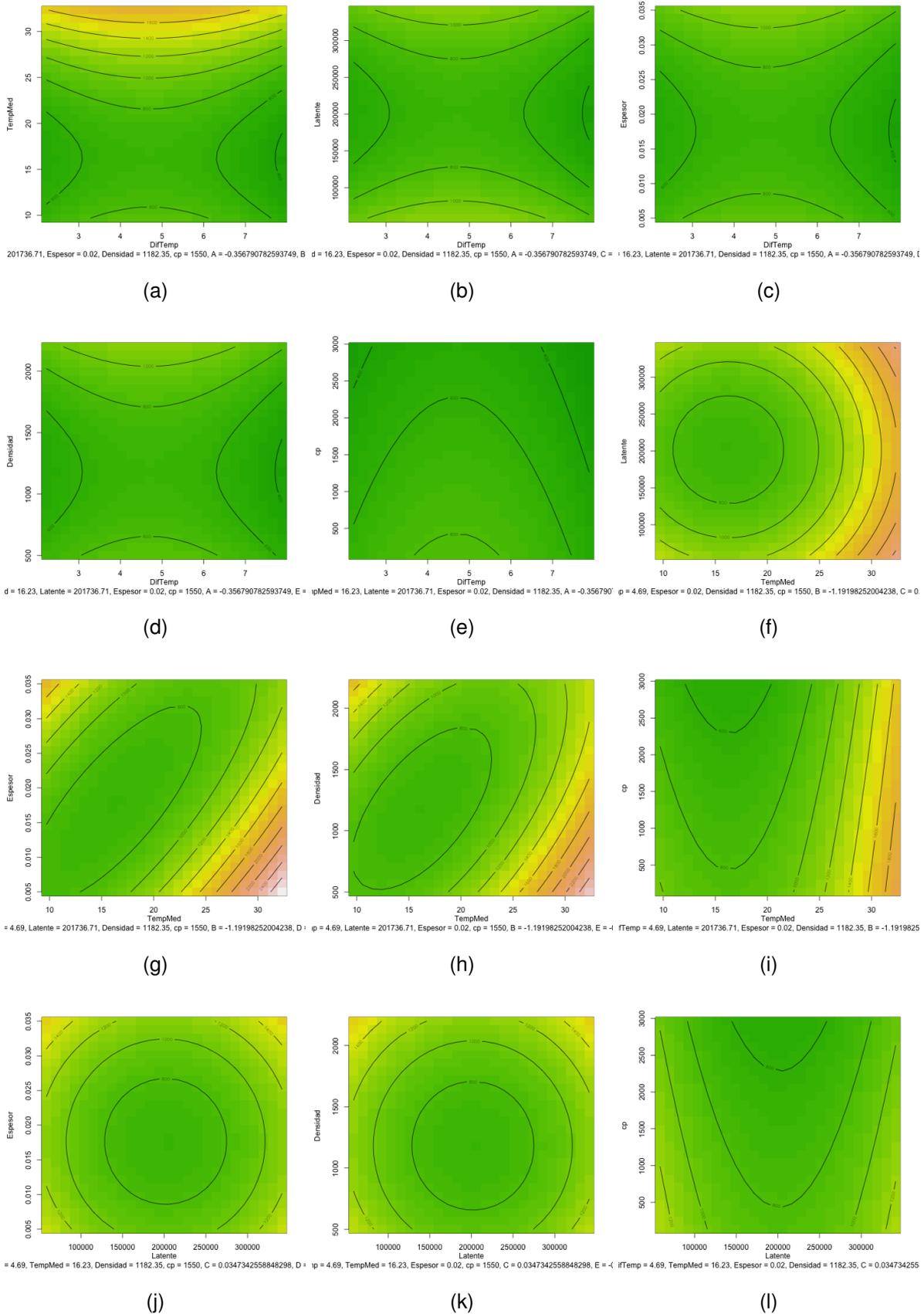


Figura 11.30: Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de acondicionamiento, lote 2

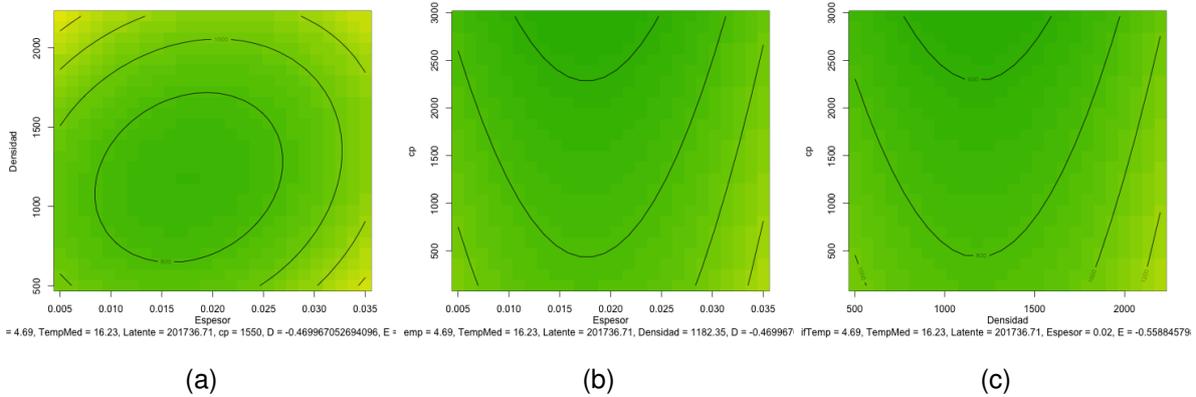


Figura 11.31: Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de acondicionamiento, lote 2. Continuación

la temperatura media del interior del cubículo para cada uno de los ensayos realizados.

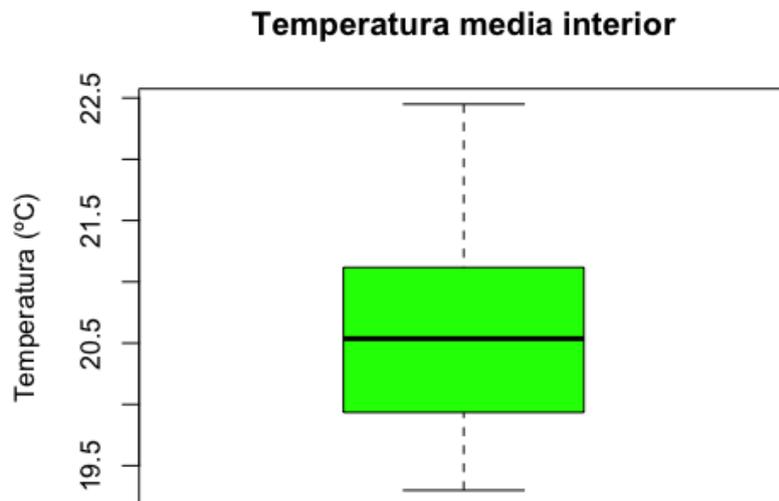


Figura 11.32: Temperatura media del interior del cubículo para el lote 2

La temperatura media del interior del cubículo varía entre un mínimo de 19.3 °C y un máximo de 22.45 °C, siendo su mediana 20.54°C, muy cercana a la media que es de 20.46°C.

En las figuras 11.30a, y 11.30f a 11.30i se presenta la relación de la temperatura media de cambio de fase con el resto de variables. En estas figuras se muestra que para temperaturas de cambio de fase por encima de 25 °C la demanda de energía de acondicionamiento aumenta visiblemente. Las figuras 11.30g a 11.30i presentan un mínimo que se sitúa entre los 16 °C y 20 °C, en función de los valores del resto de variables. Para analizar mejor la dependencia

de esta temperatura, se ha representado la demanda en función de la variable, en la figura 11.29b. En esta figura se puede observar que los valores más bajos de la temperatura media corresponde con el valor medio de la temperatura en lote de ensayos, de 21 °C. De hecho, los dos valores mínimos se corresponden con los ensayos 79 y 83, con los valores extremos, máximo y mínimo del intervalo de cambio de temperatura, y el resto de variables en su valor medio. Este resultado coincide con lo ya mencionado por el resto de autores, puesto que la temperatura media del interior del cubículo se sitúa en torno a 20.5 °C, y la temperatura de cambio de fase de 21 °C es la más cercana de todas las simuladas.

En la figura 11.33 se ha representado para cada simulación, la demanda de acondicionamiento en función del valor absoluto de la diferencia entre la temperatura media de cambio de fase, y la temperatura media del interior del cubículo. Los colores de los puntos representan distintos valores de la densidad, siendo el verde 1350 kg/m<sup>3</sup>, el rojo 1650 kg/m<sup>3</sup> y el azul 1050 kg/m<sup>3</sup>. Los dos valores negros se corresponden con las corridas axiales y unos valores de 501 kg/m<sup>3</sup> y 2199 kg/m<sup>3</sup>. Como se puede observar, para valores menores de la diferencia de temperaturas, la demanda de energía tiende a disminuir. Esta tendencia se observa también analizando el resto de variables, y por lo tanto se puede concluir que es deseable usar PCMs con temperatura media de cambio de fase lo más cercana posible a la temperatura del interior del cubículo.

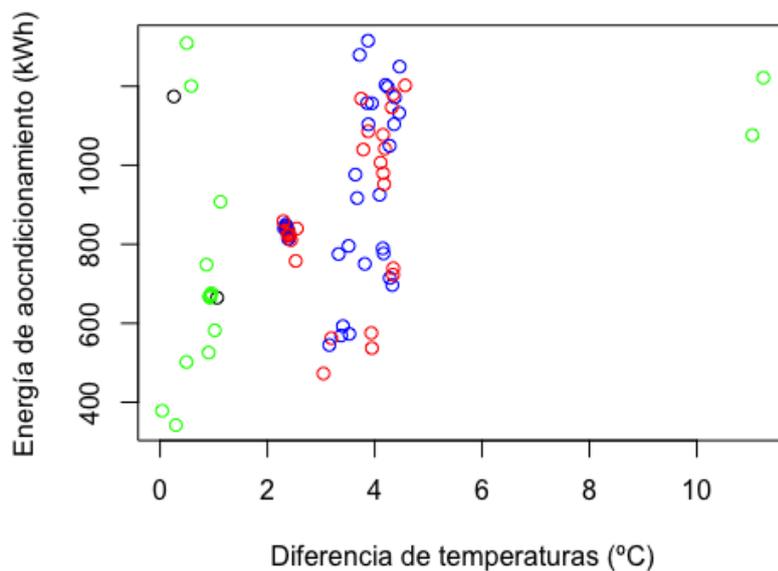


Figura 11.33: Demanda de acondicionamiento del lote 2 en función de la temperatura media de cambio de fase

El calor latente de cambio de fase se representa en las figuras 11.30b, 11.30f y 11.30j a 11.30l. En todas las figuras se puede apreciar con claridad que la demanda de acondicionamiento presenta un mínimo para el valor de calor latente de 200 kJ/kg.



El espesor de la capa de PCM se representa en las figuras 11.30c, 11.30g, 11.30j, 11.31a y 11.31b. En este caso se observa también un valor óptimo que reduce la demanda de energía de acondicionamiento, y que se encuentra entre los valores de 15 mm y 20 mm. En las simulaciones se ha establecido una distancia entre nodos de 5 mm, con lo que no es posible obtener información sobre estos espesores intermedios. Disminuir este intervalo espacial supone una carga excesiva de computación, y tal y como se puede apreciar en las figuras, no existe gran diferencia entre los valores del mínimo y los valores para los espesores simulados.

La densidad del PCM se representa en las figuras 11.30d, 11.30h, 11.30k, 11.31a y 11.31c. Esta variable también presenta un valor óptimo, en torno a los 1200 kg/m<sup>3</sup>, tal y como se deduce el análisis del modelo ajustado.

Finalmente, en lo que respecta al calor específico, representado en las figuras 11.30e, 11.30i, 11.30l, 11.31b y 11.31c, se observa que al aumentar su valor, disminuye la demanda de acondicionamiento.

**11.2.3.6.1. Dirección de descenso** Como se ha comentado en este apartado, la mayoría de variables analizadas presentan un valor óptimo en la zona central de análisis, o una tendencia clara. Así, la temperatura media de cambio de fase se debe situar lo más cercana posible a la temperatura media del interior, el calor latente en torno a 200 kJ/kg, el espesor entre 15 y 20 mm, la densidad en torno a 1200 kg/m<sup>3</sup>, y el calor específico lo más alto posible, sin presentar ningún valor óptimo dentro del rango de análisis, que como se ha comentado, coincide con los valores habituales de los PCM. La conductividad parece no ejercer apenas influencia en la demanda final de energía de acondicionamiento.

De todos modos, se ha encontrado una variable que es necesario analizar con mayor detenimiento, y es el intervalo de temperaturas de cambio de fase. Tal y como proponen los autores analizados, el mejor comportamiento se presenta con intervalos de cambio de fase lo más estrechos posibles. Sin embargo estos análisis se han realizado siempre con intervalos relativamente bajos, de hasta 4 °C. En el análisis aquí realizado se observa que intervalos mayores a 6 °C también parecen dar buenos resultados en la reducción de la demanda, y por eso se ha decidido analizar en mayor profundidad esta variable.

En vista de esto, se ha planteado una nueva batería de simulaciones, buscando minimizar el valor de la demanda de acondicionamiento, usando para ellos los valores de ajuste mejorados de la tabla 11.37. En esta ocasión se ha podido analizar tanto el descenso mediante análisis canónico, siguiendo el ajuste de segundo orden, como el de pendiente máxima usando un ajuste de primer orden. Los valores de las variables en las simulaciones planteadas se presentan en la tabla 11.39.

Las simulaciones 1 a 21 se corresponden con el análisis canónico, de segundo orden, y sólo varían en el valor del intervalo de temperatura de cambio de fase. La variación del intervalo parte de valores mínimos, hasta un valor muy superior al analizado previamente, llegando casi a 10 °C de intervalo de cambio de fase. Por su parte, las simulaciones del 22 al 41 siguen el análisis de máxima pendiente, de primer orden, y sólo analizan la parte alta de intervalos de

ID	$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (J/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)	$k_{liq}$ (W/m·K)
1	0.10	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
2	0.19	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
3	0.69	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
4	1.19	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
5	1.69	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
6	2.19	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
7	2.69	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
8	3.19	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
9	3.69	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
10	4.19	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
11	4.69	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
12	5.19	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
13	5.69	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
14	6.19	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
15	6.69	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
16	7.19	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
17	7.69	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
18	8.19	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
19	8.69	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
20	9.19	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
21	9.69	16.232	201750	0.02	1182.3	1550	0.3	0.35
22	5.25	20.108	200700	0.02	1383.0	1711	0.3	0.35
23	5.75	19.968	200950	0.02	1395.6	1843	0.3	0.35
24	6.31	19.956	201000	0.02	1400.1	1895	0.3	0.35
25	6.85	19.956	201050	0.02	1402.2	1919	0.3	0.35
26	7.39	19.956	201050	0.02	1403.4	1934	0.3	0.35
27	7.91	19.960	201100	0.02	1404.0	1943	0.3	0.35
28	8.43	19.960	201100	0.02	1404.6	1950	0.3	0.35
29	8.94	19.960	201100	0.02	1405.2	1955	0.3	0.35
30	9.45	19.960	201100	0.02	1405.5	1959	0.3	0.35
31	9.96	19.960	201100	0.02	1405.8	1962	0.3	0.35
32	10.47	19.964	201100	0.02	1405.8	1965	0.3	0.35
33	10.97	19.964	201100	0.02	1406.1	1967	0.3	0.35
34	11.48	19.964	201100	0.02	1406.4	1969	0.3	0.35
35	11.98	19.964	201100	0.02	1406.4	1971	0.3	0.35
36	12.49	19.964	201100	0.02	1406.4	1972	0.3	0.35
37	12.99	19.964	201100	0.02	1406.7	1973	0.3	0.35
38	13.49	19.964	201100	0.02	1406.7	1974	0.3	0.35
39	14.00	19.964	201100	0.02	1406.7	1975	0.3	0.35
40	14.50	19.964	201100	0.02	1407.0	1976	0.3	0.35
41	15.00	19.964	201100	0.02	1407.0	1977	0.3	0.35

Tabla 11.39: Secuencia de datos en la dirección de descenso máximo

cambio de fase. Igual que en los casos anteriores, se han reajustado algunos valores, para coincidir con los requisitos del programa de simulación por ejemplo, y poner los espesores en múltiplos de 5 mm<sup>14</sup>. También se ha tenido que modificar el valor del intervalo de temperaturas para el ensayo 1, puesto que el análisis canónico proponía asignarle un valor negativo, algo que resulta físicamente imposible.

Con este conjunto de simulaciones, se han repetido todos los cálculos necesarios para obtener las demandas de acondicionamiento en las nuevas configuraciones, que se muestran en la tabla 11.40. El diagrama de caja de la figura 11.34 representa los valores obtenidos para la demanda de energía de acondicionamiento, comparando el lote 2 inicial, con las simulaciones adicionales que se han planteado. Como se puede observar en el diagrama de caja, el aumento que se ha propuesto presenta en general mejor comportamiento que el lote original, pero sigue dentro de los rangos de demanda que presentaba el propio lote inicial. En la figura 11.35 se ha representado la demanda de energía de acondicionamiento del aumento del lote 2 en función del intervalo de temperaturas de cambio de fase. Como se puede observar, la demanda se va reduciendo al aumentar el intervalo de temperatura, hasta un intervalo de en torno a 10 °C. A partir de ese valor, la demanda de energía de acondicionamiento se estanca, sin observarse mayores reducciones.

<sup>14</sup>En este caso todos los espesores que había que ensayar estaban en torno a 0.02 m, con lo que no se va a variar ese valor en las simulaciones planteadas



ID	$Q_{hvac}$ (kWh)	$Q_{cal}$ (kWh)	$Q_{ref}$ (kWh)	$B_{hvac}$ (kWh)	$U_{ex}$ (W/m <sup>2</sup> K)
1	950.742	944.203	6.539	44.905	0.02662
2	944.027	937.757	6.270	44.610	0.02620
3	936.463	931.566	4.897	44.328	0.02533
4	902.010	897.299	4.711	42.803	0.02357
5	866.475	861.366	5.109	41.192	0.02156
6	843.087	838.685	4.403	40.182	0.01964
7	836.096	831.858	4.237	39.873	0.01898
8	846.843	843.362	3.481	40.396	0.01941
9	845.424	841.589	3.835	40.316	0.01953
10	848.875	845.035	3.840	40.471	0.01971
11	854.153	850.307	3.846	40.708	0.02011
12	819.209	813.878	5.331	39.039	0.01873
13	819.196	813.863	5.332	39.039	0.01874
14	810.982	805.311	5.671	38.700	0.01859
15	800.508	794.527	5.981	38.236	0.01826
16	696.567	685.276	11.291	33.439	0.01406
17	746.286	411.554	334.732	18.960	0.00266
18	600.679	406.733	193.946	19.463	0.00101
19	725.711	386.171	339.540	17.730	0.00004
20	716.766	372.873	343.893	17.046	-0.00140
21	705.507	360.909	344.598	16.520	-0.00271
22	655.553	638.233	17.319	31.238	0.01190
23	675.886	660.565	15.321	32.431	0.01341
24	707.614	693.782	13.832	34.058	0.01475
25	682.687	669.204	13.483	32.724	0.01347
26	486.954	439.043	47.911	22.268	0.00346
27	519.677	471.804	47.873	23.846	0.00511
28	541.429	497.529	43.899	25.071	0.00669
29	633.283	613.316	19.967	30.365	0.01156
30	491.889	451.531	40.358	22.766	0.00431
31	475.113	427.836	47.278	21.676	0.00300
32	401.317	329.841	71.477	16.878	-0.00243
33	408.048	349.250	58.798	17.835	-0.00111
34	356.651	185.242	171.409	8.921	-0.01431
35	397.953	322.214	75.739	16.513	-0.00285
36	472.546	421.463	51.083	21.451	0.00282
37	396.016	316.163	79.853	16.204	-0.00326
38	450.519	379.216	71.303	19.319	0.00113
39	484.145	366.940	117.206	18.758	-0.00123
40	412.092	337.909	74.182	17.228	-0.00137
41	483.894	280.036	203.858	13.493	-0.00956

Tabla 11.40: Resultados del aumento del lote 2

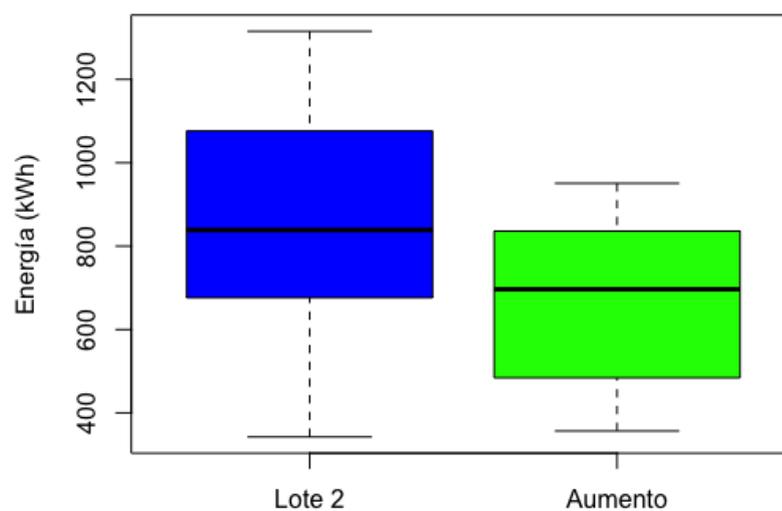


Figura 11.34: Demanda de acondicionamiento del lote 2 y del aumento del lote

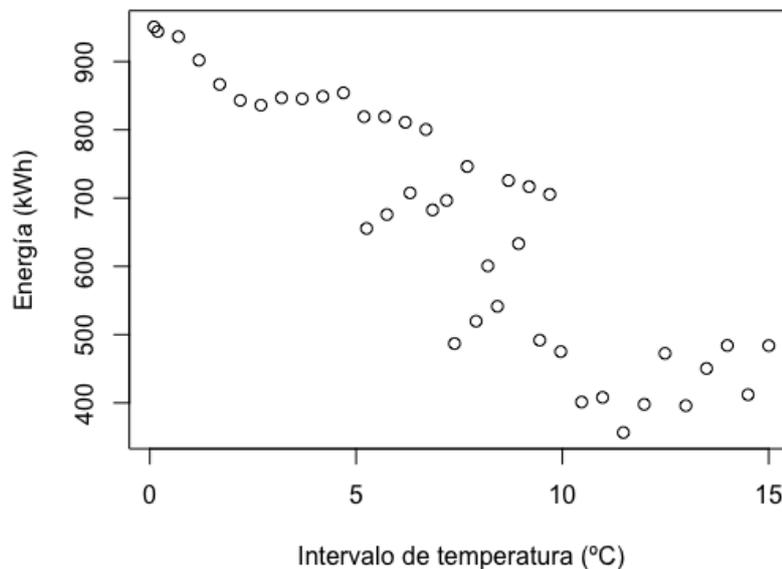


Figura 11.35: Demanda de acondicionamiento del aumento del lote 2 en función del intervalo de temperatura

Este estancamiento de la reducción de la demanda tiene sentido si analizamos los valores en los que se están moviendo las simulaciones. Estas simulaciones con un elevado intervalo de temperatura de cambio de fase se han realizado una temperatura media 20 °C, con lo que el cambio de fase ocurre entre los 15 °C y los 25 °C, con lo que se abarca completamente la fluctuación de temperaturas del interior del cubículo, que fluctúa entre 17 °C y 25 °C. Aumentar el intervalo de cambio de fase por encima de los 10 °C no presenta por lo tanto ninguna mejora, puesto que el PCM ya no es capaz de aprovechar el intervalo completo de fluctuación de temperaturas. De esta forma, para las condiciones de diseño interiores que se han propuesto un intervalo de 10 °C y uno de 15 °C son similares.

Con respecto a los intervalos de cambio de fase menores, la figura 11.35 resulta engañosa. Para los valores más bajos del intervalo de temperaturas, la demanda de energía de acondicionamiento presenta valores elevados. Estos valores se corresponden con las simulaciones primeras del lote, que provienen del análisis canónico, y usan una temperatura de cambio de fase muy baja, lejos del óptimo que se encontraba en torno a 21 °C, con lo que no se le debe prestar demasiada atención. Como ya se ha comentado con antelación, la simulación 79 se había realizado con un intervalo de temperaturas muy bajo, de 2.22 °C, y presenta el valor mínimo de demanda de acondicionamiento. Por lo tanto, se puede concluir que los intervalos de temperatura bajos, con la elección correcta del resto de variables, también es una buena alternativa para reducir la demanda total de acondicionamiento.

Como conclusión, aumentar el intervalo de cambio de fase hasta igualar la fluctuación total de temperaturas del interior, puede ser una medida interesante para mejorar el comportamien-



to de los materiales de cambio de fase. Esta conclusión resulta de gran interés, sobre todo desde una perspectiva económica. Los autores analizados coinciden en destacar la importancia de un intervalo de cambio de fase lo más estrecho posible, lo que implica usar materiales muy puros, lo que incrementa de manera notable el coste económico de su aplicación. La posibilidad de usar intervalos de cambio de fase amplios, en el mismo rango que la oscilación de temperaturas del interior, permitiría usar PCMs de menor grado de pureza, o mezclas de sustancias, lo que puede reducir el coste de materiales.

### 11.2.3.7. PCM interior. Demanda de calefacción

La demanda de energía de acondicionamiento se ha obtenido como suma de las demandas de calefacción y de refrigeración. Por eso, además de analizar el comportamiento global, resulta de interés analizar cada uno de los modos de acondicionamiento interior por separado. La demanda de refrigeración con el PCM por el interior varía entre un máximo de 1065 kWh para la simulación 62, y un mínimo de 221 kWh para la simulación 24. Las propiedades de esta simulación 24 se encuentran en la tabla 11.41. Se han representado también las dos simulaciones siguientes con demanda mínima de calefacción, simulaciones 79 y 83, que coinciden con las mismas que obtenían la demanda mínima total de acondicionamiento, pero que en este caso presentan una demanda superior al mínimo, en torno a 280 kWh. Por lo

ID	$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (J/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)	$k_{liq}$ (W/m·K)
24	4.05	25.00	250000	0.025	1650	2050	0.200	0.250
79	2.22	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
83	7.88	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350

Tabla 11.41: Propiedades de simulación para los valores mínimos de la demanda de calefacción

tanto, para la demanda de calefacción existe una combinación de variables que presenta una demanda mínima, distinta de las combinaciones que se obtenían una demanda mínima total de acondicionamiento.

La tabla 11.42 representa el ajuste de primer orden sobre la demanda de calefacción para el lote 2, con el PCM por el interior, y la tabla 11.43 el ajuste de segundo orden.

Como se puede observar en la tabla 11.42, el ajuste de primer orden, medido en función de los coeficientes  $R^2$  es bastante malo, con lo que se va a descartar directamente.

Respecto al ajuste de segundo orden, de la tabla 11.43, se observa que los parámetros de ajuste y los estadísticos presentan un comportamiento notablemente superior. En este ajuste se presentan los elementos principales del cambio de fase con bastante significatividad. Tanto el intervalo de cambio de fase (variable A), como la temperatura media (variable B) y el calor latente (variable C) presentan términos lineales, cruzados con otras variables, y cuadráticos.

A pesar del buen ajuste que se consigue con el modelo de segundo orden, se decide mejorarlo eliminando las variables que presentan menor significatividad. Se presenta en la tabla 11.44 el modelo mejorado, en el que se han eliminado los términos que menos aportan al resultado final.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	729.4630	21.9577	33.22	0.0000
A	-27.4755	22.6334	-1.21	0.2285
B	45.1486	22.6334	1.99	0.0497
C	40.1510	22.6334	1.77	0.0801
D	-21.9222	22.3557	-0.98	0.3299
E	-11.7246	22.6334	-0.52	0.6059
F	-58.3709	22.6334	-2.58	0.0118
G	19.9625	22.6334	0.88	0.3806
H	3.4370	22.6334	0.15	0.8797
R <sup>2</sup> múltiple			0.1853	
R <sup>2</sup> ajustado			0.0995	
Estadístico F			2.16 sobre 8 y 76	
Valor p			0.04002	

Tabla 11.42: Coeficientes de ajuste para la demanda de calefacción del lote 2, de primer orden

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	644.5357	55.7274	11.57	0.0000
A	-27.4755	13.9354	-1.97	0.0556
B	45.1486	13.9354	3.24	0.0024
C	40.1510	13.9354	2.88	0.0063
D	-21.9222	13.7644	-1.59	0.1191
E	-11.7246	13.9354	-0.84	0.4052
F	-58.3709	13.9354	-4.19	0.0001
G	19.9625	13.9354	1.43	0.1598
H	3.4370	13.9354	0.25	0.8064
A:B	23.4639	15.5802	1.51	0.1399
A:C	31.5286	15.5802	2.02	0.0497
A:D	18.1565	15.5802	1.17	0.2508
A:E	6.6555	15.5802	0.43	0.6715
A:F	0.1195	15.5802	0.01	0.9939
A:G	10.2693	15.5802	0.66	0.5136
A:H	-26.8614	15.5802	-1.72	0.0924
B:C	-27.0470	15.5802	-1.74	0.0903
B:D	-105.7326	15.5802	-6.79	0.0000
B:E	-83.4496	15.5802	-5.36	0.0000
B:F	-68.7215	15.5802	-4.41	0.0001
B:G	11.2632	15.5802	0.72	0.4739
B:H	-3.2267	15.5802	-0.21	0.8370
C:D	-20.3424	15.5802	-1.31	0.1991
C:E	-3.9364	15.5802	-0.25	0.8018
C:F	5.2187	15.5802	0.33	0.7394
C:G	3.0162	15.5802	0.19	0.8475
C:H	2.1783	15.5802	0.14	0.8895
D:E	-31.7987	15.5802	-2.04	0.0479
D:F	-30.6187	15.5802	-1.97	0.0564
D:G	-10.6834	15.5802	-0.69	0.4969
D:H	11.4054	15.5802	0.73	0.4684
E:F	-25.6069	15.5802	-1.64	0.1081
E:G	11.9474	15.5802	0.77	0.4477
E:H	0.2393	15.5802	0.02	0.9878
F:G	-2.5655	15.5802	-0.16	0.8700
F:H	-5.7785	15.5802	-0.37	0.7127
G:H	-6.2562	15.5802	-0.40	0.6902
A^2	-36.7837	12.5939	-2.92	0.0057
B^2	34.2823	12.5939	2.72	0.0096
C^2	32.4257	12.5939	2.57	0.0138
D^2	25.1938	11.2817	2.23	0.0312
E^2	27.2412	12.5939	2.16	0.0366
F^2	4.2025	12.5939	0.33	0.7404
G^2	-5.3761	12.5939	-0.43	0.6718
H^2	8.4197	12.5939	0.67	0.5076
R <sup>2</sup> múltiple			0.8374	
R <sup>2</sup> ajustado			0.6586	
Estadístico F			4.683 sobre 44 y 40	
Valor p			1.329e-06	

Tabla 11.43: Coeficientes de ajuste para la demanda de calefacción del lote 2, de segundo orden



	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	656.7413	30.7706	21.34	0.0000
A	-27.4755	12.8035	-2.15	0.0361
B	45.1486	12.8035	3.53	0.0008
C	40.1510	12.8035	3.14	0.0027
D	-21.9222	12.6464	-1.73	0.0883
E	-11.7246	12.8035	-0.92	0.3636
F	-58.3709	12.8035	-4.56	0.0000
A:B	23.4639	14.3148	1.64	0.1066
A:C	31.5286	14.3148	2.20	0.0316
A:D	18.1565	14.3148	1.27	0.2097
A:E	6.6555	14.3148	0.46	0.6437
A:F	0.1195	14.3148	0.01	0.9934
B:C	-27.0470	14.3148	-1.89	0.0638
B:D	-105.7326	14.3148	-7.39	0.0000
B:E	-83.4496	14.3148	-5.83	0.0000
B:F	-68.7215	14.3148	-4.80	0.0000
C:D	-20.3424	14.3148	-1.42	0.1606
C:E	-3.9364	14.3148	-0.27	0.7843
C:F	5.2187	14.3148	0.36	0.7168
D:E	-31.7987	14.3148	-2.22	0.0302
D:F	-30.6187	14.3148	-2.14	0.0367
E:F	-25.6069	14.3148	-1.79	0.0789
A^2	-37.9413	10.9007	-3.48	0.0010
B^2	33.1247	10.9007	3.04	0.0036
C^2	31.2681	10.9007	2.87	0.0057
D^2	24.1285	9.7305	2.48	0.0161
E^2	26.0836	10.9007	2.39	0.0200
R <sup>2</sup> múltiple		0.8010		
R <sup>2</sup> ajustado		0.7118		
Estadístico F		8.981 sobre 26 y 58		
Valor p		2.826e-12		

Tabla 11.44: Coeficientes de ajuste para la demanda de calefacción del lote 2, mejorado

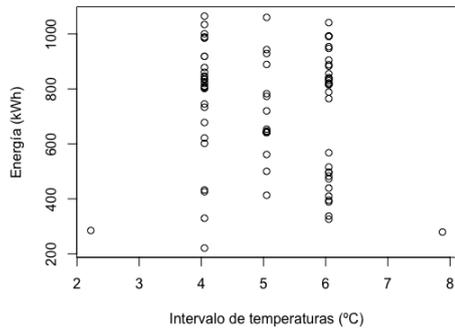
Para completar el análisis de la influencia de cada variable, se ha representado gráficamente en la figura 11.36.

El intervalo de temperatura de cambio de fase (figura 11.36a), presenta aparentemente una tendencia a disminuir la demanda de calefacción con intervalos de temperatura estrechos. Aún así, la demanda para el intervalo de temperaturas máximos también es muy reducida. Para analizar mejor la influencia del intervalo de temperatura, se decide añadir los datos de las simulaciones aumentadas que del análisis del apartado anterior. Se han representado los datos del lote 2 en azul, y las de las simulaciones aumentadas en color verde, en la figura 11.37.

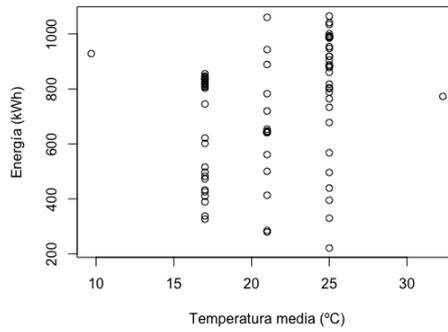
La influencia del intervalo de temperatura de cambio de fase no parece muy notable según este gráfico. Se observan valores algo mayores de demanda de calefacción para la zona central del lote 2, con un  $\Delta T$  en torno a 5 °C, pero la diferencia no parece del todo importante. Vista la gran disparidad de valores para la demanda que se observa para esa zona central de simulaciones, se puede deducir que hay otros factores que ejercen mayor influencia sobre la demanda de calefacción.

Por otra parte, el resultado con cambios de fase estrecho que se observan en la parte izquierda del gráfico no son muy representativos, puesto que las simulaciones para el aumento del lote 2, en verde, se han realizado con temperaturas medias muy bajas. Para el lado derecho del gráfico, con cambio de fase más amplios, se observa una ligera mejora de la demanda de calefacción, pero hay que destacar que esos ensayos se han realizado con el resto de variables en sus valores óptimos, y que aun así siguen obteniendo demandas de calefacción comparables al resto del lote 2 de simulaciones.

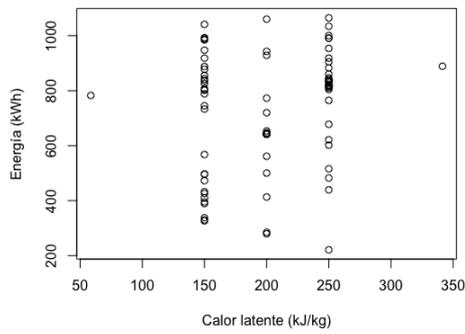
En vista de estos resultados, se puede concluir que el intervalo de temperaturas de cambio



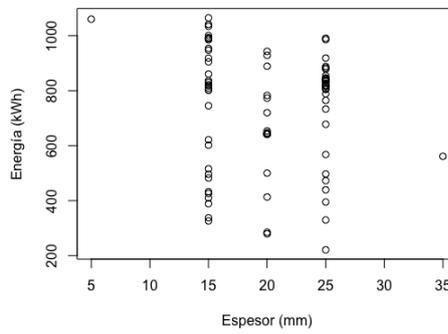
(a)



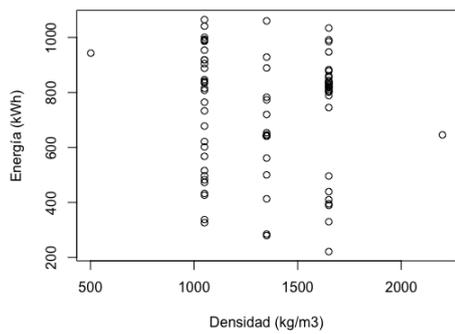
(b)



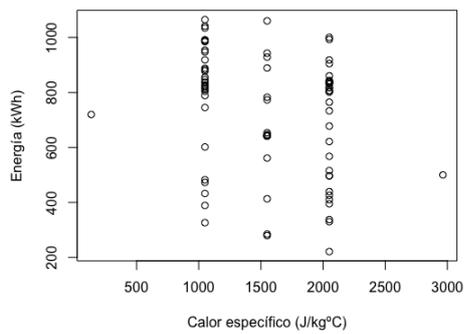
(c)



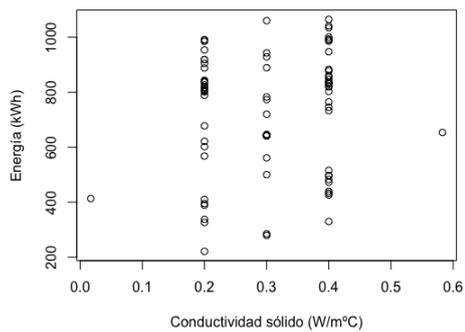
(d)



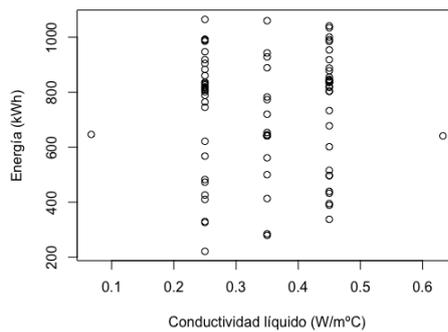
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 11.36: Evolución de la demanda de calefacción con cada variable. Lote 2

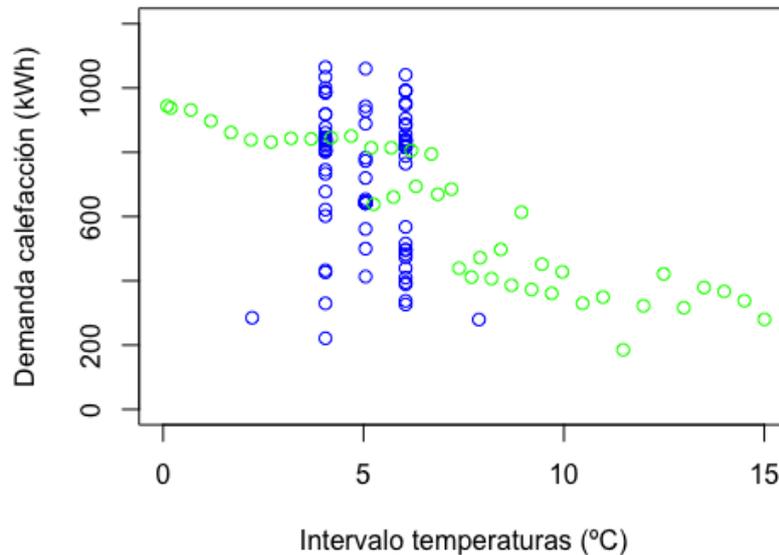


Figura 11.37: Demanda de calefacción en función del intervalo de temperatura de cambio de fase. Lote 2 y aumento del lote

de fase presenta una influencia menor sobre la demanda de calefacción, y aunque para un  $\Delta T$  en torno a 5 °C se observan los peores valores, la diferencia no es muy notable.

La temperatura media de cambio de fase se representa en la figura 11.29b. La demanda mínima se obtiene para la temperatura media de 25 °C. De todos modos la influencia de esta variable no es fácilmente deducible, puesto que presenta una gran disparidad de demandas para la temperatura de 25 °C, disparidad que va disminuyendo al disminuir la temperatura media de cambio de fase.

Un factor importante en los materiales de cambio de fase es la diferencia entre la temperatura media del interior del cubículo, y la del cambio de fase. Ya se analizó esta relación para la demanda total de acondicionamiento, concluyendo que se obtenía menor demanda de energía cuando la diferencia entre ambas temperatura era menor. Respecto a la demanda de calefacción, se ha representado en función de esta diferencia de temperaturas en la figura 11.38. Se ha representado el lote 2 en color azul, y en verde el aumento del lote. Comparando este gráfico con el que se había obtenido para la demanda de acondicionamiento, figura 11.33, se puede observar que al contrario de lo que sucede con la demanda total de acondicionamiento, para la demanda de calefacción se obtienen menores demandas para diferencias de temperatura en torno a 2 °C, mientras que para una diferencia de temperaturas cercana a cero la demanda es mayor. Por lo tanto, si lo que se desea primar es la disminución de la demanda de calefacción, resulta deseable que la temperatura media de cambio de fase difiera de la media del interior del cubículo. En concreto, los puntos que ofrecen menor demanda de calefacción coinciden con la simulación 34 del lote aumentado, y la simulación 24 del lote 2. La simulación

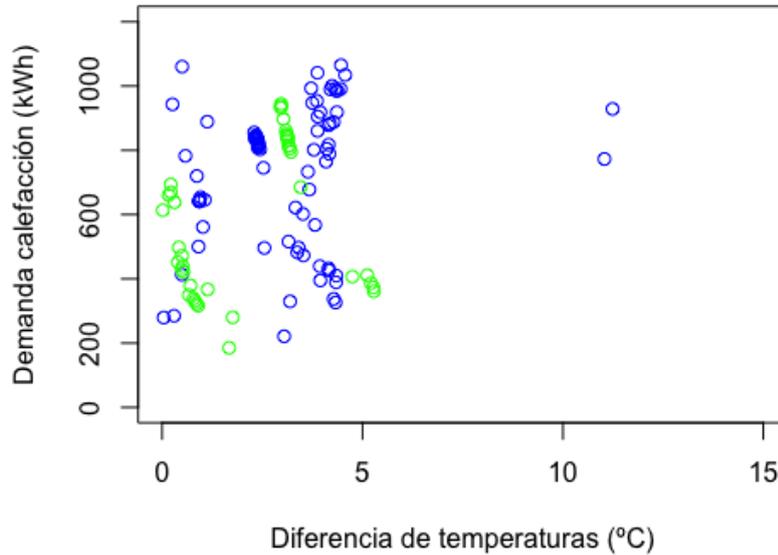


Figura 11.38: Demanda de calefacción del PCM interior en función de la diferencia de temperatura entre el cambio de fase y el interior del cubículo

34 presenta una temperatura media 1.67 °C por debajo de la media del interior del cubículo, mientras que la simulación 24 presenta una temperatura media de cambio de fase 3 °C por encima de la temperatura media del interior. Parece por lo tanto que esa diferencia de temperaturas se puede dar en ambos sentidos, bien por encima de la temperatura media interior, como por debajo. Esta disparidad puede ser debida a otras interacciones entre variables, que van a ser analizadas más adelante.

Uno de los efectos importantes es el intervalo de temperaturas en el que sucede el cambio de fase. Para la simulación 34 del lote aumentado, el intervalo de temperaturas es de 11.48 °C, y su temperatura media de cambio de fase es de 19.96 °C. Esto supone que el PCM está cambiando de fase entre 14.22 °C y 25.70 °C, y por lo tanto está continuamente en estado de cambio de fase, y haciendo uso del calor latente<sup>15</sup>. Para la simulación 24 del lote 2, el intervalo de cambio de fase es de 4.05 °C, y la temperatura media es de 25 °C, con lo que la transición de fase sucede entre 22.98 °C y 27.03 °C. En este caso el calor latente sólo aparece para las condiciones en las que el cubículo está a mayor temperatura, lo que en régimen de calefacción (invierno) sucede sólo durante el día, debido a la entrada de radiación solar del exterior. En este caso, el PCM actúa como almacenamiento de la radiación solar, que se libera cuando la temperatura del interior del cubículo cae, retrasando la entrada del sistema de calefacción.

Respecto al resto de variables, el calor latente (figura 11.36c), el espesor (figura 11.36d), la densidad (figura 11.36e), y el calor efectivo (figura 11.36f), hacen disminuir la demanda de

<sup>15</sup>Hay que recordar que la temperatura interior del cubículo varía entre los 17 °C y los 25 °C



calefacción al aumentar su valor, mientras que ambas conductividades, la de estado sólido (figura 11.36g), y la de estado líquido (figura 11.36h), hacen disminuir la demanda al disminuir su valor.

Se ha representado también la interrelación entre cada par de variables en las figuras 11.39 y 11.40. Para las variables no representadas en cada subfigura, se han usado los valores de la tabla 11.45. Como se puede observar, las interrelaciones son bastante complejas en general,

$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (kJ/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	cp (J/kg·K)
5.05	21	200	0.02	1350	1550

Tabla 11.45: Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.39 y 11.40

debido a los términos cruzados y cuadráticos presentes.

El intervalo de temperaturas se presenta en las figuras 11.39a a 11.39e. Excepto para la relación con el calor específico, en el resto presenta un punto de silla, en el que se minimiza la demanda hacia ambos extremos del intervalo de temperaturas. Igual que sucedía para la demanda de acondicionamiento total, la demanda de calefacción se puede disminuir tanto disminuyendo el intervalo de cambio de fase, como aumentándolo. El punto menos adecuado se encuentra en la zona central de análisis, en torno a 5 °C de intervalo de cambio de fase.

La temperatura media de cambio de fase se representa en las figuras 11.39a y 11.39f a 11.39i. La temperatura media de cambio de fase presenta un punto de silla en su relación con todas las variables, excepto con el calor latente, de la figura 11.39f, para el que presenta un mínimo. Analizando el resto de variables, para las que se presentan formas de punto de silla, se observa en las esquinas de los gráficos que aumentar o disminuir de forma importante la temperatura media de cambio de fase podría conseguir una reducción de la demanda. Ya se ha comentado con anterioridad que los márgenes de los gráficos se han obtenido por interpolación de los valores extremos de las simulaciones, y por lo tanto se sustentan sobre pocos valores, y pueden inducir a errores en la interpretación. Por ese motivo se ha decidido volver a representar la demanda de calefacción, en este caso en función de la temperatura media de cambio de fase, incluyendo los datos del aumento de simulaciones en color verde, en la figura 11.41. Se puede observar en este gráfico que la demanda presenta una tendencia a disminuir en la zona central del lote, en torno a 20-21 °C. Se observa también un valor bajo para una de las simulaciones realizadas con una temperatura media de 25 °C. Este valor se corresponde con la simulación 24, en la que parece que se han obtenido las tendencias óptimas del resto de variables.

El calor latente se representa en las figuras 11.39b, 11.39f, y 11.39j a 11.39l. Esta variable presenta un mínimo en casi todas las figuras, excepto en la figura 11.39b, que presenta un punto de silla, y 11.39l, que podría presentar un mínimo, pero fuera de la zona de análisis. En general, el valor que presenta un mínimo de demanda de calefacción se encuentra entre 150 kJ/kg y 220 kJ/kg.

Si se representa la demanda de calefacción en función del calor latente, se puede analizar

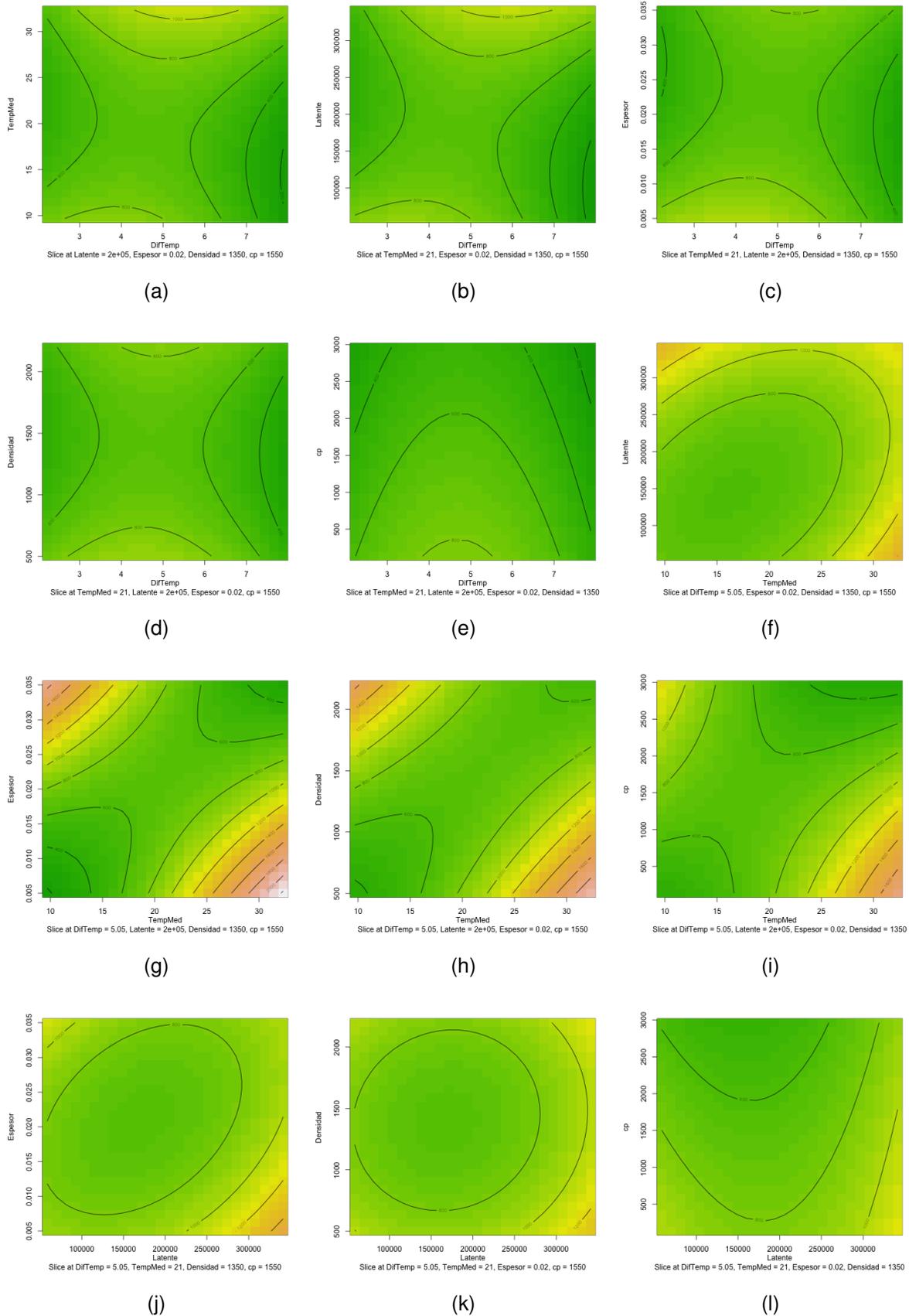


Figura 11.39: Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de calefacción, lote 2

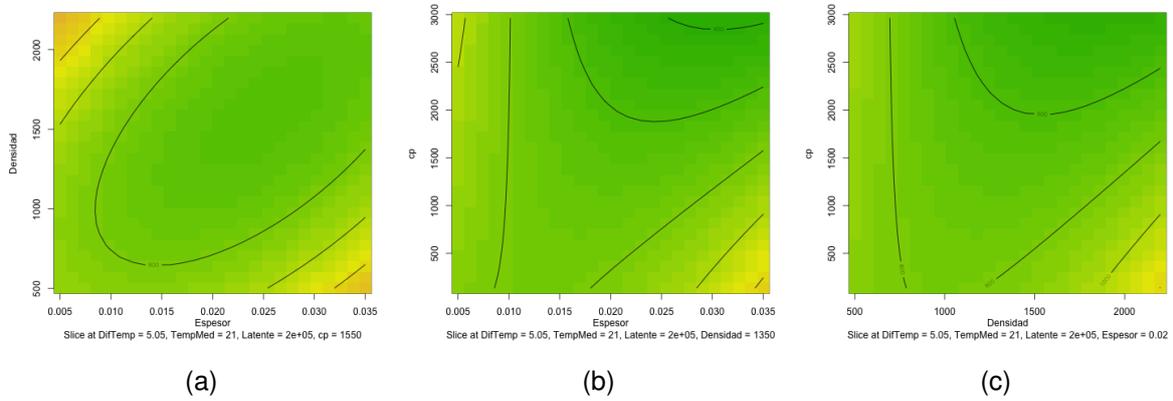


Figura 11.40: Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de calefacción, lote 2. Continuación

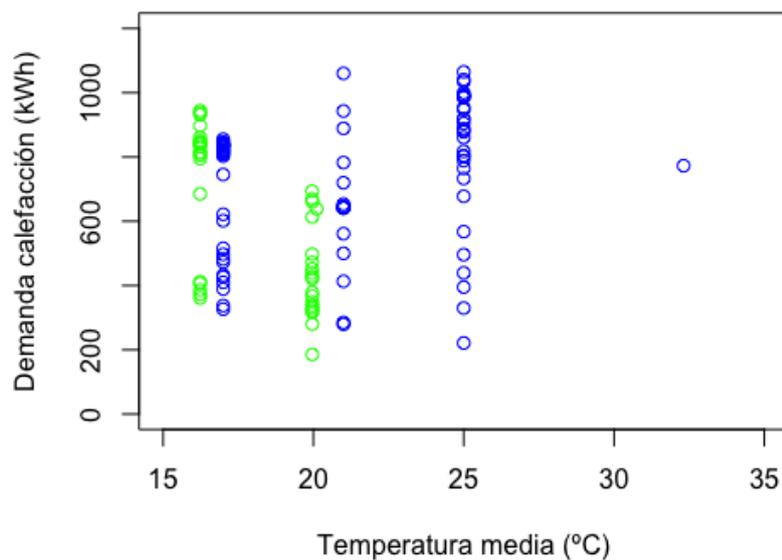


Figura 11.41: Demanda de calefacción en función de la temperatura media de cambio de fase. Lote 2 y aumento del lote

en mayor profundidad la importancia del calor latente. La figura 11.42 representa esta relación, con los datos del lote 2 en azul, y el aumento del lote 2 en verde. Tal y como se observa en

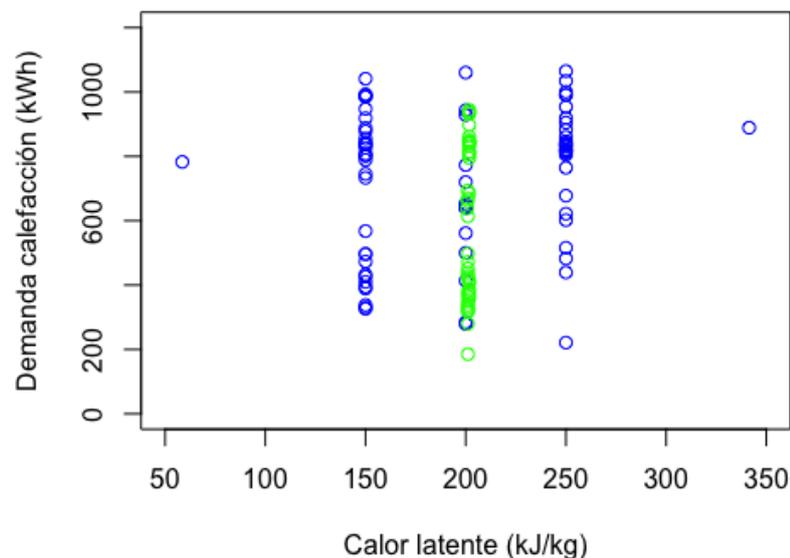


Figura 11.42: Demanda de calefacción en función del calor latente. Lote 2 y aumento del lote

esta figura, los valores mínimos de la demanda de calefacción se dan entre los valores de 200 kJ/kg y 250 kJ/kg. Este valor puede cambiar en función del resto de variables. Tal y como se deduce de cada una de las subfiguras, existen interrelaciones fuertes entre las variables. Por ejemplo, para una temperatura de cambio de fase más alta, resulta interesante aumentar también el calor latente. Lo mismo sucede con el espesor. Sin embargo la densidad parece no tener apenas influencia en el calor latente, igual que sucede con el calor específico.

El espesor se presenta en las figuras 11.39c, 11.39g, 11.39j, 11.40a y 11.40b. La mayoría de figuras presentan valores óptimos para el espesor entre 15 mm y 25 mm. Sin embargo, para la relación con la temperatura media, figura 11.39g, se parece deducir que alejar el espesor de estos valores medios, tanto aumentando como disminuyendo el espesor, produce menor demanda de calefacción. Teniendo en cuenta que esa tendencia aparece en las esquinas de la figura, se representa la demanda de calefacción en función del espesor, para aclarar mejor su relación. La figura 11.43 representa esta relación, con los valores del lote 2 en azul, y del aumento del lote 2 en verde. Tal y como se observa en esta figura, la menor demanda se da para los espesores medios del lote de simulaciones, entre 20 y 25 mm. Aún así el espesor puede ser algo mayor si se aumenta el calor latente (figura 11.39j), la densidad (figura 11.39k), o el calor específico (figura 11.39l).

La densidad se representa en las figuras 11.39d, 11.39h, 11.39k, 11.40a y 11.40c. En esta variable también se presentan valores óptimos en torno a la zona central de análisis,

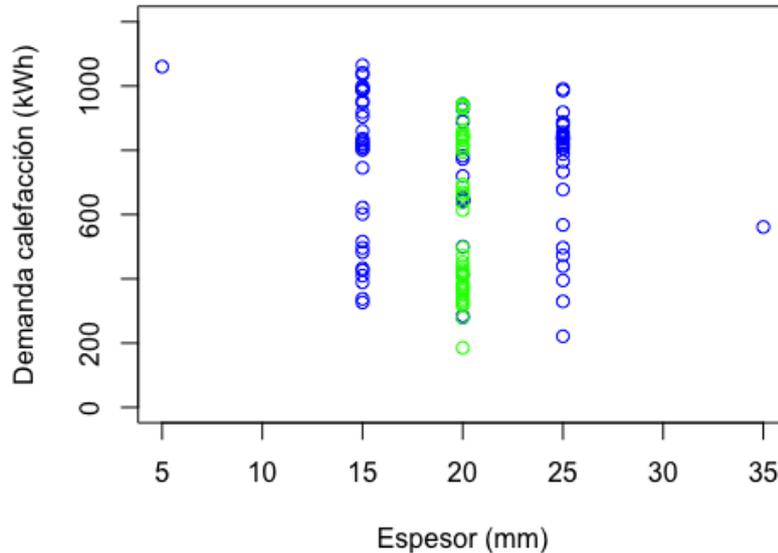


Figura 11.43: Demanda de calefacción en función del espesor. Lote 2 y aumento del lote

con densidades entre  $1000 \text{ kg/m}^3$  y  $1500 \text{ kg/m}^3$ . En su relación con la temperatura media de cambio de fase, figura 11.39h, parece que el óptimo se encuentra en los extremos de la densidad, pero ya se ha descartado con antelación la adecuación de esa figura en los bordes. En la figura 11.40c también parece que la combinación de una densidad elevada con un calor específico elevado presenta un valor de la demanda de calefacción menor. Debido a que una vez más esa relación se encuentra en la esquina del gráfico, se ha representado en la figura 11.44 la demanda de calefacción en función de la densidad para todos los resultados de las simulaciones del lote 2, en azul, y del aumento del lote, en verde. Tal y como se puede observar, los mejores resultados se han obtenido para los valores medios de las simulaciones, con una densidad de  $1350 \text{ kg/m}^3$ .

Finalmente, el calor específico se presenta en las figuras 11.39e, 11.39i, 11.39l, 11.40b y 11.40c. Para esta variable, la tendencia más clara es la de reducir la demanda de calefacción al aumentar el calor específico.

Como conclusión, la demanda de calefacción presenta valores mínimos para la zona media de las simulaciones para la mayoría de las variables. Para el intervalo de temperaturas de cambio de fase presenta una tendencia parecida a la demanda total de acondicionamiento, con menores demandas cuando se aleja de la zona central de  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ , pero con una tendencia menos marcada. Para la temperatura media de cambio de fase, se ha observado que se obtiene menor demanda de calefacción cuando existe una pequeña diferencia de temperaturas con el interior del cubículo, en torno a  $2\text{-}3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Y finalmente, para el calor específico, cuanto mayor sea su valor, mejor comportamiento muestra el material de cambio de fase.

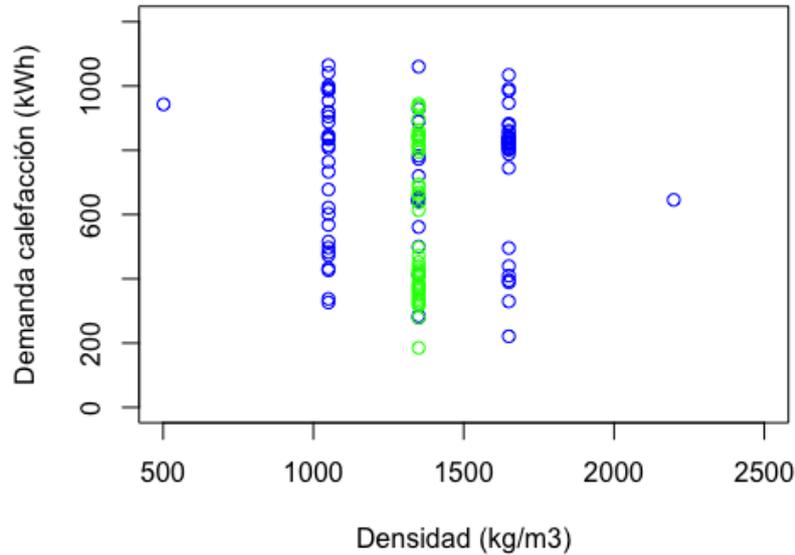


Figura 11.44: Demanda de calefacción en función de la densidad. Lote 2 y aumento del lote

### 11.2.3.8. PCM interior. Demanda de refrigeración

La demanda de refrigeración presenta una reducción importante al añadir PCM por el interior del cerramiento. Tal y como se puede observar tanto en el diagrama de caja 11.4 (página 196), como en los resultados de las simulaciones de la tabla B.7 (Apéndice B, página 330), la demanda llega prácticamente a reducirse a cero con la correcta selección de los valores de las variables.

Esta demanda de refrigeración varía entre un máximo de 418 kWh para la simulación 82, a valores mínimos que se encuentran entre los 3 y 4 kWh. La tabla 11.46 representa los valores de las variables para estas simulaciones que presentan una demanda de refrigeración tan reducida. La demanda mínima se consigue en la simulación 44. La variable que se mantiene

ID	$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (J/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sot}$ (W/m·K)	$k_{iq}$ (W/m·K)
6	4.05	17.00	250000	0.015	1650	2050	0.200	0.450
31	4.05	17.00	250000	0.025	1650	2050	0.400	0.450
32	4.05	17.00	150000	0.025	1050	1050	0.200	0.450
35	4.05	17.00	150000	0.025	1650	2050	0.200	0.450
39	4.05	17.00	250000	0.025	1050	1050	0.400	0.450
44	6.05	17.00	150000	0.025	1650	1050	0.400	0.450
64	4.05	17.00	250000	0.025	1650	1050	0.400	0.250

Tabla 11.46: Propiedades de simulación para los valores mínimos de la demanda de refrigeración

igual en todas las simulaciones, es la temperatura media de cambio de fase, con un valor de 17 °C. De hecho, gran cantidad de las simulaciones realizadas con esa temperatura media de cambio de fase obtiene demandas de refrigeración muy reducidas. La mayoría de simulaciones



presentan también un intervalo de cambio de fase medio, de 4.05 °C, y una conductividad de estado líquido de 0.450 W/m·K. Teniendo en cuenta que la temperatura de cambio de fase de estas simulaciones es de 17 °C, eso supone que la mayoría del tiempo el material va a estar en estado líquido. Una gran conductividad para ese estado supone una mejor transferencia de calor en el interior del PCM, y por lo tanto un aprovechamiento más veloz del calor latente.

Las tablas 11.47 y 11.48 presentan los valores de ajuste de primer y segundo orden para la demanda de refrigeración del lote 2, con el PCM por el interior.

Como se puede observar en la tabla 11.47, el ajuste de primer orden presenta unos valores escasos de los coeficientes  $R^2$ .

Por su parte, el ajuste de segundo orden representado en la tabla 11.48 presenta unos valores de ajuste notablemente mejores, y es por lo tanto más aceptable. En este ajuste, ni el calor específico, ni las conductividades parecen tener ninguna influencia en la demanda de refrigeración. Por su parte el intervalo de temperatura de cambio de fase podría influencia en su término cuadrático, que se encuentra cercano a los valores de corte.

Se ha procedido a eliminar los elementos que presentan menos influencia, tratando de mejorar los parámetros de ajuste, sobre todo el coeficiente  $R^2$  ajustado. La tabla presenta los valores de ajuste del modelo mejorado. A pesar de la baja significatividad que presenta el intervalo de temperaturas de cambio de fase, variable A, eliminarla del modelo no consigue mejorar los coeficientes de ajuste, por lo que se ha decidido mantenerla.

Para completar el análisis de la influencia de cada variable, se ha representado gráficamente en la figura 11.45. En estas figuras hay algunas variables que presentan un comportamiento poco evidente, como son el intervalo de temperaturas de cambio de fase (figura 11.45a), el calor específico (figura 11.45f), y las conductividades de estado sólido (figura 11.45g) y estado líquido (figura 11.45h). Para el resto de variables, se observa claramente que las menores demandas se obtienen con temperaturas medias de cambio de fase bajas, con 17 °C (figura 11.45b), y se observa la tendencia a disminuir la demanda aumentando el calor latente (figura 11.45c), el espesor (figura 11.45d) y la densidad (figura 11.45e).

Para ahondar en el análisis, se ha representado la interrelación entre cada par de variables en la figura 11.46, de dos en dos. Para las variables no representadas en cada subfigura, se han usado los valores de la tabla 11.50.

El intervalo de temperaturas se representa en las figuras 11.46a a 11.46d. Tal y como se ha comentado con anterioridad, su influencia es menor en el valor definitivo de la demanda de refrigeración, no mostrando ningún patrón claro respecto a los valores más adecuados. Pero los términos cruzados con la temperatura media de cambio de fase, el espesor, y sobre todo el calor latente, sí que presentan una significatividad razonable. Analizando estos términos en las figuras 11.46a a 11.46c, se observa que es interesante reducir la temperatura media y estrechar el intervalo de temperaturas para obtener una demanda baja. Respecto al calor latente y el espesor, la tendencia es la contraria, resulta interesante aumentar tanto el calor latente, como el espesor y el intervalo de temperaturas.

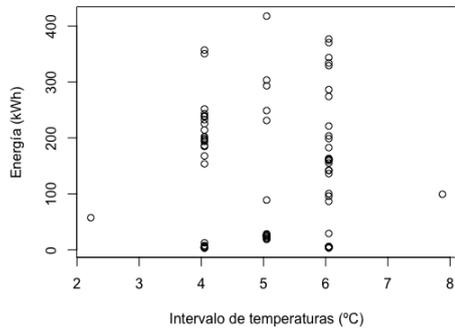
La temperatura media de cambio de fase presenta una tendencia más clara a provocar una

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	134.3996	9.9766	13.47	0.0000
A	5.6620	10.2836	0.55	0.5835
B	45.5702	10.2836	4.43	0.0000
C	-44.0496	10.2836	-4.28	0.0001
D	-43.4832	10.1574	-4.28	0.0001
E	-26.3736	10.2836	-2.56	0.0123
F	4.3135	10.2836	0.42	0.6761
G	-8.6742	10.2836	-0.84	0.4016
H	-0.2642	10.2836	-0.03	0.9796
R <sup>2</sup> múltiple			0.4575	
R <sup>2</sup> ajustado			0.4003	
Estadístico F			8.01 sobre 8 y 76	
Valor p			9.069e-08	

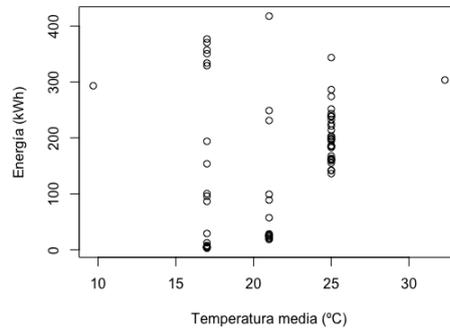
Tabla 11.47: Coeficientes de ajuste para la demanda de refrigeración del lote 2, de primer orden

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	26.5192	26.0362	1.02	0.3145
A	5.6620	6.5107	0.87	0.3897
B	45.5702	6.5107	7.00	0.0000
C	-44.0496	6.5107	-6.77	0.0000
D	-43.4832	6.4308	-6.76	0.0000
E	-26.3736	6.5107	-4.05	0.0002
F	4.3135	6.5107	0.66	0.5114
G	-8.6742	6.5107	-1.33	0.1903
H	-0.2642	6.5107	-0.04	0.9678
A:B	-14.8432	7.2792	-2.04	0.0481
A:C	-22.7560	7.2792	-3.13	0.0033
A:D	-14.6880	7.2792	-2.02	0.0504
A:E	7.8188	7.2792	1.07	0.2892
A:F	-3.2342	7.2792	-0.44	0.6592
A:G	-15.4439	7.2792	-2.12	0.0401
A:H	-0.2641	7.2792	-0.04	0.9712
B:C	20.2328	7.2792	2.78	0.0083
B:D	28.8103	7.2792	3.96	0.0003
B:E	20.3790	7.2792	2.80	0.0078
B:F	9.0161	7.2792	1.24	0.2227
B:G	14.9760	7.2792	2.06	0.0462
B:H	0.3121	7.2792	0.04	0.9660
C:D	30.4678	7.2792	4.19	0.0002
C:E	8.0459	7.2792	1.11	0.2756
C:F	-3.2572	7.2792	-0.45	0.6569
C:G	-6.4867	7.2792	-0.89	0.3782
C:H	-2.6546	7.2792	-0.36	0.7173
D:E	17.2216	7.2792	2.37	0.0229
D:F	0.3284	7.2792	0.05	0.9642
D:G	11.3726	7.2792	1.56	0.1261
D:H	-1.9375	7.2792	-0.27	0.7915
E:F	2.5735	7.2792	0.35	0.7255
E:G	-6.7642	7.2792	-0.93	0.3583
E:H	-2.9865	7.2792	-0.41	0.6838
F:G	1.3251	7.2792	0.18	0.8565
F:H	-12.4636	7.2792	-1.71	0.0946
G:H	-0.2222	7.2792	-0.03	0.9758
A^2	9.2898	5.8839	1.58	0.1223
B^2	36.7958	5.8839	6.25	0.0000
C^2	26.7704	5.8839	4.55	0.0000
D^2	14.2676	5.2709	2.71	0.0099
E^2	15.1396	5.8839	2.57	0.0139
F^2	2.8825	5.8839	0.49	0.6269
G^2	6.4696	5.8839	1.10	0.2781
H^2	2.6511	5.8839	0.45	0.6547
R <sup>2</sup> múltiple			0.8855	
R <sup>2</sup> ajustado			0.7596	
Estadístico F			7.033 sobre 44 y 40	
Valor p			3.577e-09	

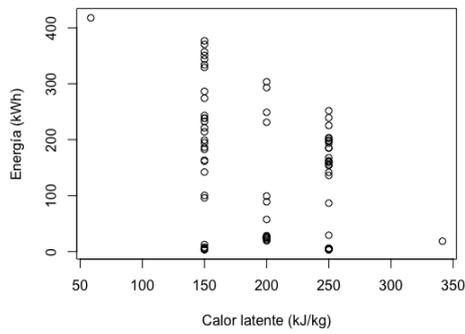
Tabla 11.48: Coeficientes de ajuste para la demanda de refrigeración del lote 2, de segundo orden



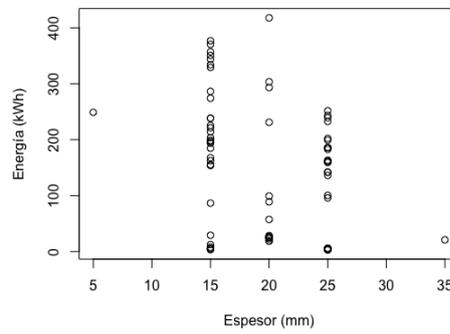
(a)



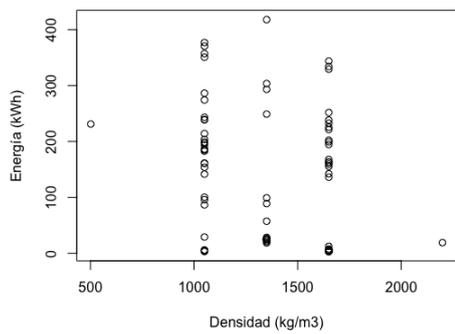
(b)



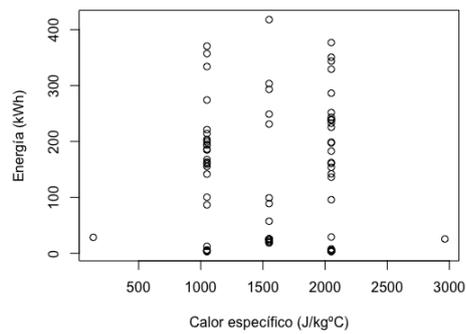
(c)



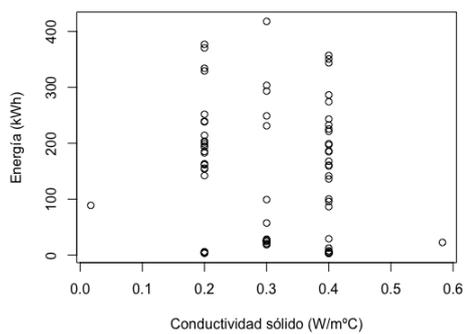
(d)



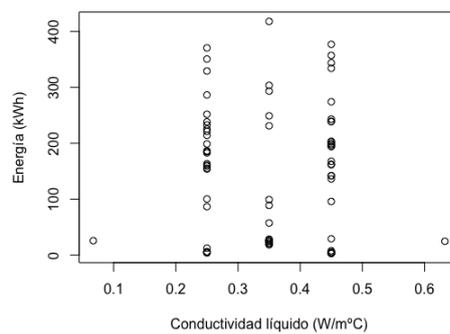
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 11.45: Evolución de la demanda de refrigeración con cada variable. Lote 2

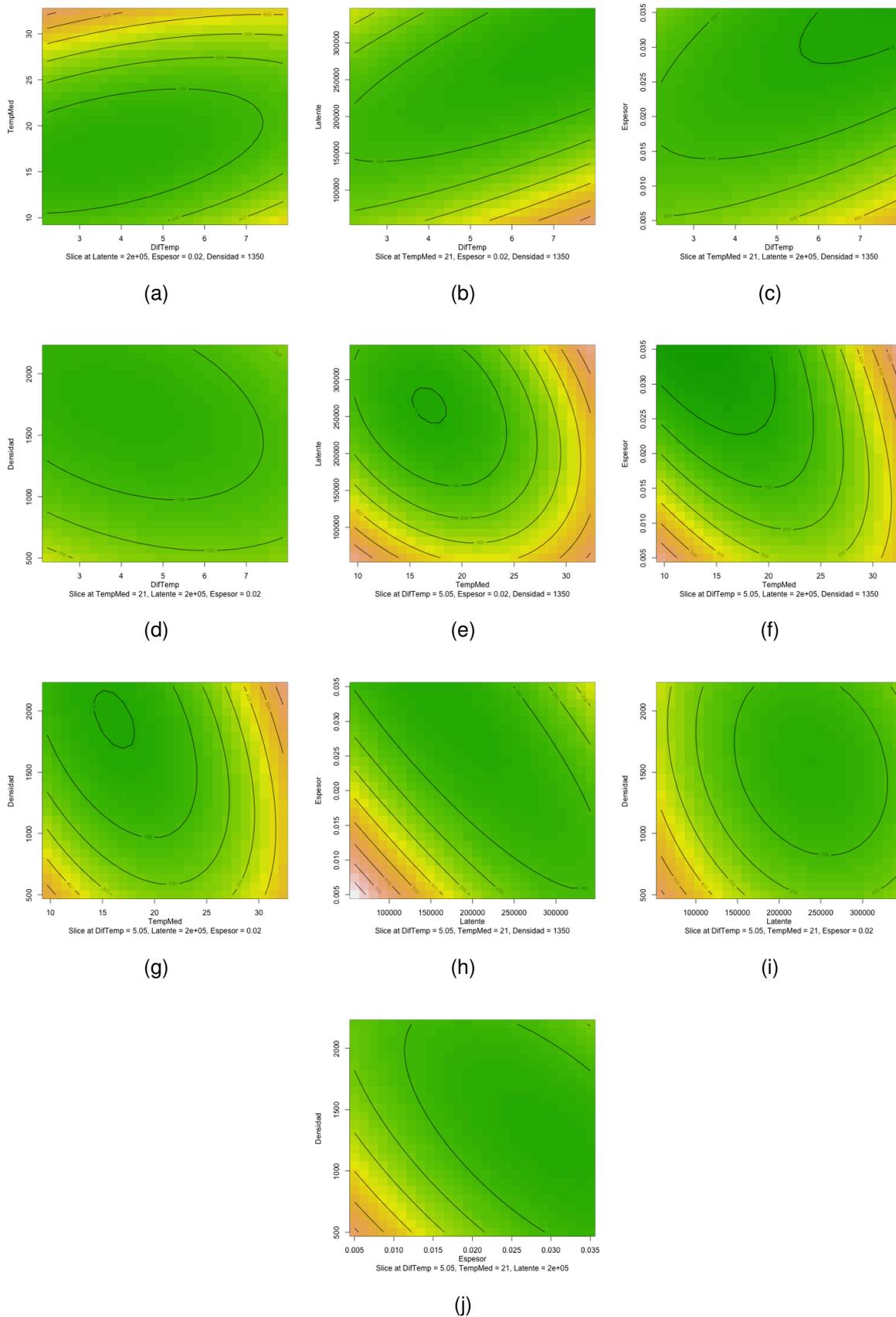


Figura 11.46: Relación entre las variables del modelo mejorado para la demanda de refrigeración, lote 2



	Estimate	Std. Error	t value	Pr(>  t )
(Intercept)	46.7377	15.3681	3.04	0.0034
A	5.6620	6.3946	0.89	0.3792
B	45.5702	6.3946	7.13	0.0000
C	-44.0496	6.3946	-6.89	0.0000
D	-43.4832	6.3162	-6.88	0.0000
E	-26.3736	6.3946	-4.12	0.0001
A:B	-14.8432	7.1494	-2.08	0.0419
A:C	-22.7560	7.1494	-3.18	0.0023
A:D	-14.6880	7.1494	-2.05	0.0440
A:E	7.8188	7.1494	1.09	0.2782
B:C	20.2328	7.1494	2.83	0.0062
B:D	28.8103	7.1494	4.03	0.0002
B:E	20.3790	7.1494	2.85	0.0059
C:D	30.4678	7.1494	4.26	0.0001
C:E	8.0459	7.1494	1.13	0.2646
D:E	17.2216	7.1494	2.41	0.0189
A^2	7.3722	5.4442	1.35	0.1805
B^2	34.8782	5.4442	6.41	0.0000
C^2	24.8528	5.4442	4.56	0.0000
D^2	12.5028	4.8598	2.57	0.0124
E^2	13.2221	5.4442	2.43	0.0180
R <sup>2</sup> múltiple			0.8233	
R <sup>2</sup> ajustado			0.7681	
Estadístico F			14.91 sobre 20 y 64	
Valor p			< 2.2e-16	

Tabla 11.49: Coeficientes de ajuste para la demanda de refrigeración del lote 2 mejorado

$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (kJ/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
5.05	21	200	0.02	1350

Tabla 11.50: Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.46

demanda de refrigeración más baja al reducir su valor por debajo de los 20 °C, tal y como se puede observar en las figuras 11.46a y 11.46e a 11.46g. En todas ellas los valores menores se dan por debajo de los 20 °C, lo que resulta contrario a lo observado tanto para la demanda de acondicionamiento total, como para la demanda de calefacción. Para analizar mejor esta tendencia, se ha representado la demanda de refrigeración en función de la temperatura media de cambio de fase en la figura 11.47, con los valores del lote de simulaciones en azul, y los valores del aumento del lote en verde. Tal y como se puede observar, los valores menores de la demanda de refrigeración se obtienen para los valores más bajos de temperatura media ensayados, en los que la demanda es prácticamente nula, entre 3 y 4 kWh anuales, para unas temperaturas de cambio de fase de 17 °C y 16.2 °C. Para la temperatura media del ensayo de 21 °C, también se consiguen demandas reducidas, pero en el rango de 20 kWh. Resulta por lo tanto evidente que para reducir la demanda de calefacción interesa usar temperaturas de cambio de fase por debajo de la temperatura media del interior del cubículo, y que sería incluso posible eliminar casi por completo esta demanda de refrigeración.

El calor latente de cambio de fase se encuentra representado en las figuras 11.46b, 11.46e, 11.46h y 11.46i. Tal y como se observa en estas figuras, los valores menores de la demanda de refrigeración se observan en el rango de 200-300 kJ/kg, aunque en la figura 11.46e parece apuntar que para valores mayores del calor latente se podría disminuir todavía más la demanda de refrigeración. Como esa tendencia se apunta en una de las esquinas de la figura, se ha decidido representar la demanda de refrigeración en función del calor latente en la figura 11.48, con los resultados de las simulaciones del lote 2 en azul, y los resultados del aumento del lote

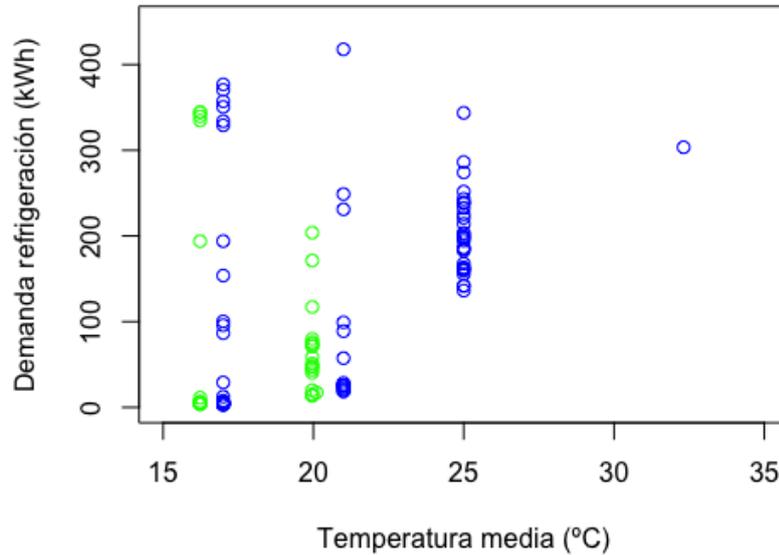


Figura 11.47: Demanda de refrigeración en función de la temperatura media. Lote 2 y aumento del lote

en verde. Tomando sólo los valores mínimos para cada calor latente simulado, se observa que se obtienen valores bajos de la demanda de refrigeración en todo el rango central de la simulación, desde 150 hasta 250 kJ/kg, con lo que la tendencia presentada en los gráficos se debe más a un artificio del propio ajuste. Lo que sí que se aprecia, observando cada valor de simulación y comparándolo con el resto, es que los resultados de las simulaciones con 250 kJ/kg presentan en general mejor resultado que los que tienen valores de calor latente más bajos. Por lo tanto, sí que se puede afirmar que resulta interesante aumentar el calor latente por lo menos hasta 250 kJ/kg.

El espesor se presenta en las figuras 11.46c, 11.46f, 11.46h y 11.46j. Como se puede observar, la tendencia general apunta a que para mayores espesores, la demanda de refrigeración se reduce. En su relación con el calor latente, parece sin embargo que para valores elevados de calor latente, es mejor emplear espesores medios. Se observa la misma tendencia en relación con la densidad. Como estos efectos se muestran en una de las esquinas del gráfico, se ha representado la demanda de refrigeración en función del espesor en la figura 11.49, con los valores del lote de simulaciones en azul, y los valores del aumento del lote en verde. Igual que sucedía con el calor latente, para todos los espesores simulados, se presentan configuraciones en las que las demandas de refrigeración son bajas, pero de media, los valores para el espesor de 25 mm son menores que los que se obtienen para el resto de espesores.

Sin embargo, en el gráfico 11.49 no se aprecia el efecto cruzado con las dos variables en las que se observaban efectos extraños, el calor latente y la densidad. Se ha representado el mismo gráfico, pero marcando en distintos colores los valores del calor latente, en la figura

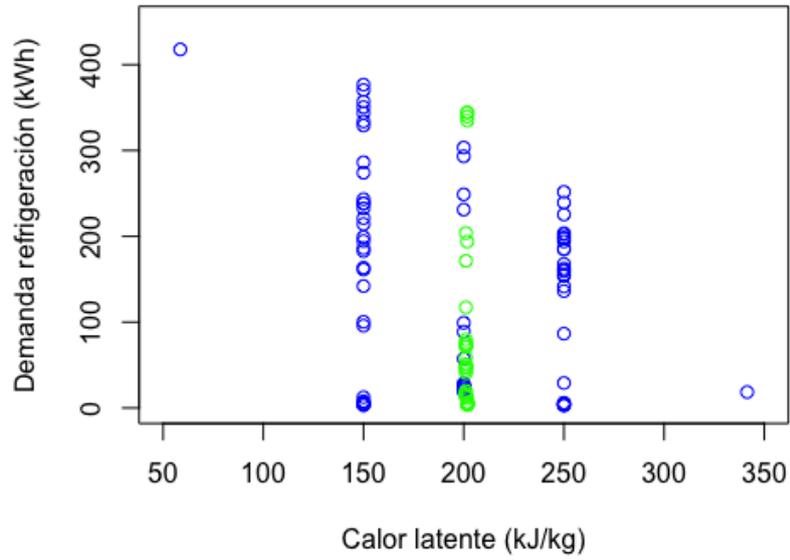


Figura 11.48: Demanda de refrigeración en función del calor latente. Lote 2 y aumento del lote

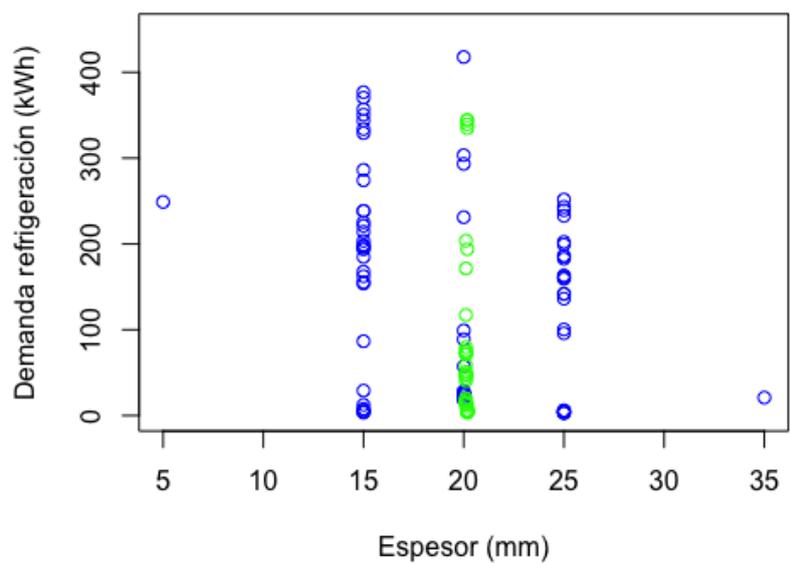


Figura 11.49: Demanda de refrigeración en función del espesor. Lote 2 y aumento del lote

11.50. Se ha realizado sólo para el lote 2, que presenta más variabilidad de espesor y calor

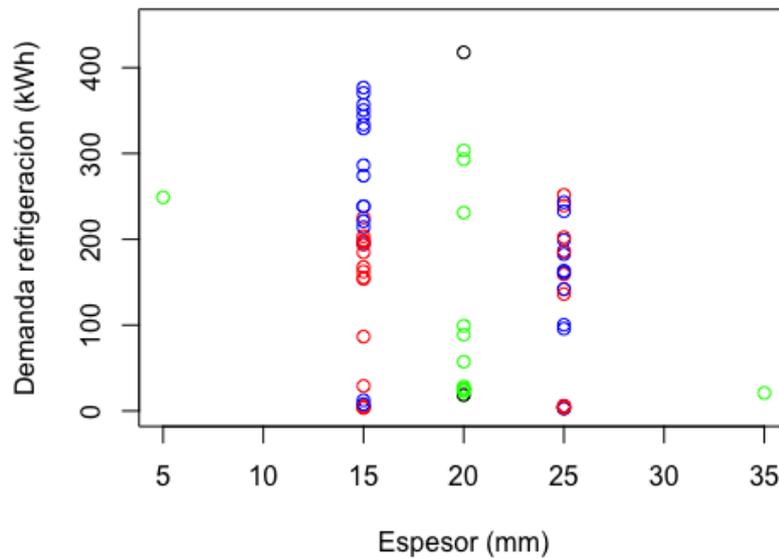


Figura 11.50: Demanda de refrigeración en función del espesor diferenciando valores de calor latente. Lote 2

latente. El color rojo se corresponde con el calor latente de 250 kJ/kg, el verde con 200 kJ/kg, y el azul con 150 kJ/kg. Como se puede observar, los valores elevados de calor latente presentan mejor resultado con espesores menores, y viceversa. Sin embargo, al hacer la misma comparativa para la densidad no se observa ninguna correlación, tal y como se puede observar en la figura 11.51.

Finalmente, la densidad se presenta en las figuras 11.46d, 11.46g, 11.46i y 11.46j. La tendencia general que se observa es que aumentar la densidad disminuye la demanda de refrigeración para todas las variables, aunque presenta un rango de valores admisibles bastante amplio para las demandas de refrigeración bajas. Sin embargo, en su relación con el espesor, la figura 11.46j parece mostrar una tendencia a disminuir la densidad cuando aumenta el espesor. En la figura 11.51 ya se analizó que no parece haber una interrelación fuerte entre la densidad y el espesor. Respecto al resto de tendencias, se ha representado en la figura 11.52 la relación entre la demanda de refrigeración y la densidad, presentando los valores del lote 2 de simulaciones en azul, y los valores del aumento del lote en verde. Tal y como se puede apreciar en esta figura, no parece marcarse una tendencia clara en cuanto a la influencia de la densidad, lo que explicaría la gran amplitud de la zona de bajas demandas de refrigeración que se observa en las figuras 11.46.

Como conclusión, al situar el material del cambio de fase en el interior del cubículo se consigue una reducción importante de la demanda de refrigeración, llegando casi a eliminarla. El factor más importante de los analizados es la temperatura media de cambio de fase. Valores

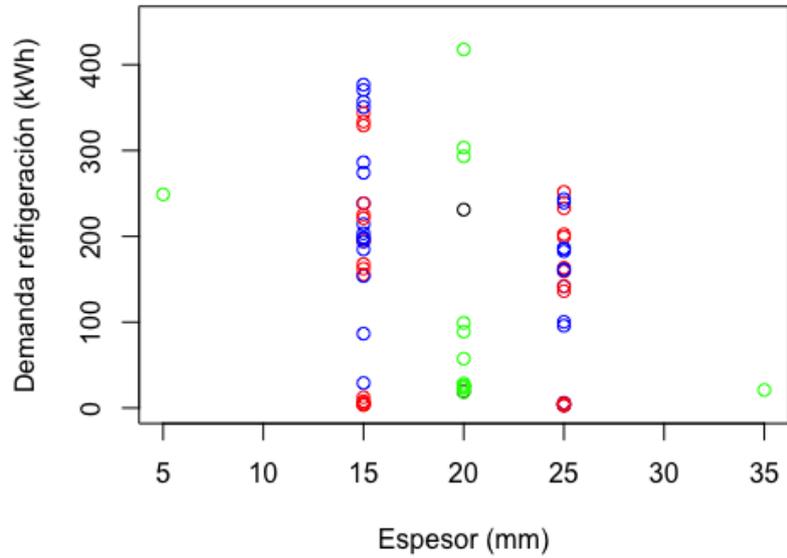


Figura 11.51: Demanda de refrigeración en función del espesor diferenciando valores de la densidad. Lote 2

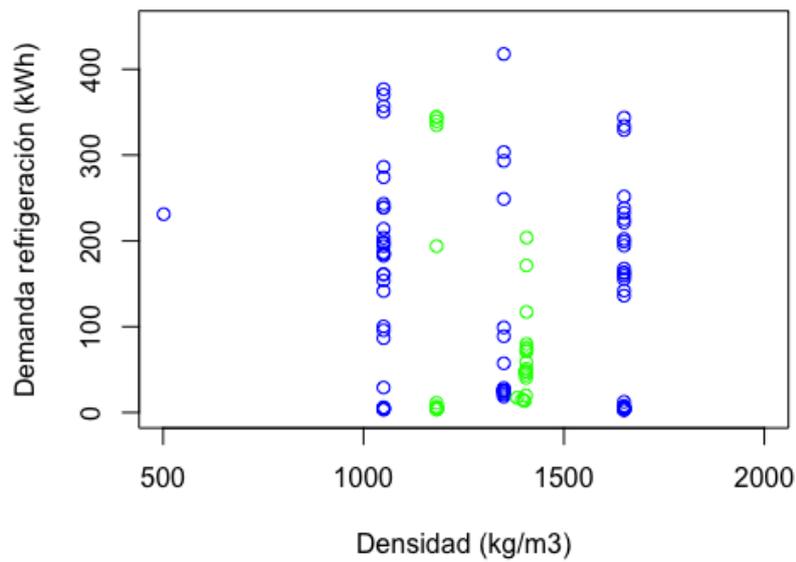


Figura 11.52: Demanda de refrigeración en función del espesor. Lote 2 y aumento del lote

de la temperatura media en torno a 15 °C y 16 °C son los que han obtenido las demandas más bajas de refrigeración. Respecto al resto de variables, el intervalo de cambio de fase tiene una influencia pequeña, aunque presenta mejor comportamiento con intervalos pequeños para temperatura media de cambio de fases bajas. El calor latente, espesor, y densidad, presentan mejor comportamiento con valores altos.

### 11.2.3.9. PCM interior. Exergía de acondicionamiento

Tal y como se observa en el diagrama de caja para la exergía de acondicionamiento (figura 11.5, en la página 197), la inclusión de un material de cambio de fase en la cara interna del cerramiento no presenta en general una mejora significativa en la exergía de acondicionamiento respecto al lote 0, sin inclusión de PCM. Sólo las configuraciones en el primer cuartil de la exergía presentan valores menores para la exergía que los del lote 0.

La exergía de acondicionamiento varía entre 51 kWh para las simulaciones 62 y 71, y un mínimo de 10 kWh para la simulación 24. Los valores de las variables de la simulación 24 se encuentran en la tabla 11.51. Esta configuración de variables es la misma que obtenía una demanda de calefacción mínima. En principio no se observa ningún patrón evidente en los valores de las variables para las simulaciones que presentan exergías bajas.

ID	$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (J/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)	$k_{liq}$ (W/m·K)
24	4.05	25.00	250000	0.025	1650	2050	0.200	0.250

Tabla 11.51: Propiedades de simulación para el valor mínimo de la exergía de acondicionamiento

Las tablas 11.52 y 11.53 presentan los coeficientes de ajuste de primer y segundo orden respectivamente, para la exergía de acondicionamiento del lote 2 de simulaciones.

Los valores del ajuste de primer orden presentan unos coeficientes  $R^2$  demasiado bajos para ser tenidos en cuenta. Sin embargo, el modelo de segundo orden presenta un ajuste bueno, tanto con los coeficientes  $R^2$ , como con el estadístico  $F$  y el valor  $p$ . En este modelo de segundo orden, las conductividades, tanto de estado sólido como líquido, no presentan una significatividad importante. Además, hay varios elementos adicionales en el modelo que presentan baja significatividad, y que podrían esconder efectos importantes. Por eso, se decide mejorar el modelo eliminando alguno de los elementos de menor peso, para mejorar el valor del coeficiente  $R^2$  ajustado, tal y como se muestra en la tabla 11.54. Como se puede ver en el modelo mejorado, el coeficiente  $R^2$  ajustado ha mejorado notablemente al eliminar las conductividades, y el término cuadrático del calor específico. Aún así, el modelo sigue siendo bastante complejo, con varios términos cruzados y cuadráticos.

Para analizar mejor la influencia de cada variable, se ha representado la exergía de acondicionamiento en función de cada una, en la figura 11.53. La existencia de varios elementos cruzados con otras variables, y los elementos cuadráticos provocan una gran dispersión en los resultados de las simulaciones, que en parte enmascaran las tendencias de cada variable.

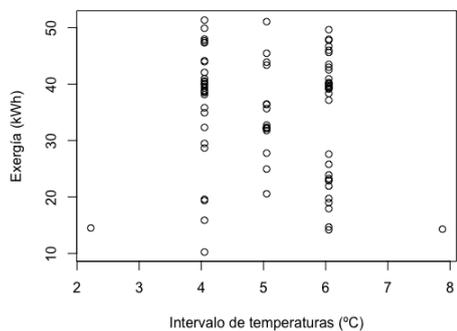


	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	35.1375	1.0466	33.57	0.0000
A	-1.2765	1.0788	-1.18	0.2404
B	2.2767	1.0788	2.11	0.0381
C	2.1374	1.0788	1.98	0.0512
D	-0.9050	1.0656	-0.85	0.3984
E	-0.4998	1.0788	-0.46	0.6445
F	-2.8628	1.0788	-2.65	0.0097
G	1.0022	1.0788	0.93	0.3558
H	0.1779	1.0788	0.16	0.8694
R <sup>2</sup> múltiple			0.1970	
R <sup>2</sup> ajustado			0.1125	
Estadístico F			7.033 sobre 8 y 76	
Valor p			0.02698	

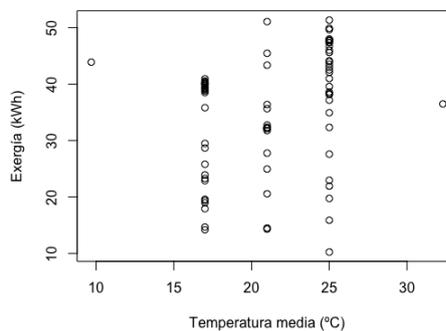
Tabla 11.52: Coeficientes de ajuste para la exergía de acondicionamiento del lote 2, de primer orden

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	32.2710	2.6142	12.34	0.0000
A	-1.2765	0.6537	-1.95	0.0579
B	2.2767	0.6537	3.48	0.0012
C	2.1374	0.6537	3.27	0.0022
D	-0.9050	0.6457	-1.40	0.1687
E	-0.4998	0.6537	-0.76	0.4490
F	-2.8628	0.6537	-4.38	0.0001
G	1.0022	0.6537	1.53	0.1331
H	0.1779	0.6537	0.27	0.7869
A:B	1.1835	0.7309	1.62	0.1132
A:C	1.6135	0.7309	2.21	0.0331
A:D	0.9736	0.7309	1.33	0.1904
A:E	0.3079	0.7309	0.42	0.6758
A:F	0.0489	0.7309	0.07	0.9470
A:G	0.5515	0.7309	0.75	0.4549
A:H	-1.2632	0.7309	-1.73	0.0916
B:C	-1.3638	0.7309	-1.87	0.0694
B:D	-5.1003	0.7309	-6.98	0.0000
B:E	-4.0353	0.7309	-5.52	0.0000
B:F	-3.3557	0.7309	-4.59	0.0000
B:G	0.4434	0.7309	0.61	0.5475
B:H	-0.1423	0.7309	-0.19	0.8466
C:D	-1.1487	0.7309	-1.57	0.1239
C:E	-0.2681	0.7309	-0.37	0.7156
C:F	0.2863	0.7309	0.39	0.6973
C:G	0.2190	0.7309	0.30	0.7660
C:H	0.1541	0.7309	0.21	0.8341
D:E	-1.5752	0.7309	-2.16	0.0372
D:F	-1.4307	0.7309	-1.96	0.0573
D:G	-0.5293	0.7309	-0.72	0.4731
D:H	0.5323	0.7309	0.73	0.4706
E:F	-1.2275	0.7309	-1.68	0.1008
E:G	0.5594	0.7309	0.77	0.4485
E:H	0.0241	0.7309	0.03	0.9738
F:G	-0.1217	0.7309	-0.17	0.8686
F:H	-0.1974	0.7309	-0.27	0.7885
G:H	-0.2971	0.7309	-0.41	0.6866
A^2	-1.8907	0.5908	-3.20	0.0027
B^2	1.3339	0.5908	2.26	0.0295
C^2	1.2475	0.5908	2.11	0.0410
D^2	1.0661	0.5292	2.01	0.0507
E^2	1.1364	0.5908	1.92	0.0615
F^2	0.1424	0.5908	0.24	0.8107
G^2	-0.3578	0.5908	-0.61	0.5482
H^2	0.3411	0.5908	0.58	0.5669
R <sup>2</sup> múltiple			0.8448	
R <sup>2</sup> ajustado			0.6741	
Estadístico F			4.949 sobre 44 y 40	
Valor p			6.238e-07	

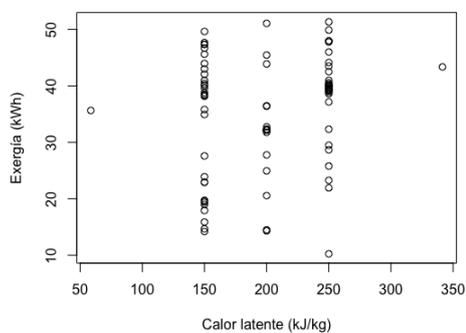
Tabla 11.53: Coeficientes de ajuste para la exergía de acondicionamiento del lote 2, de segundo orden



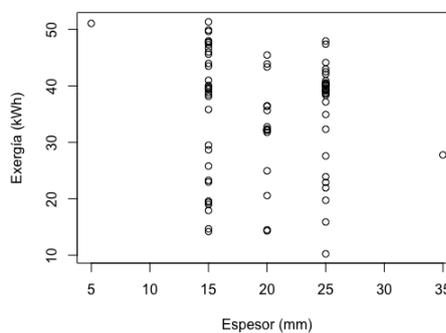
(a)



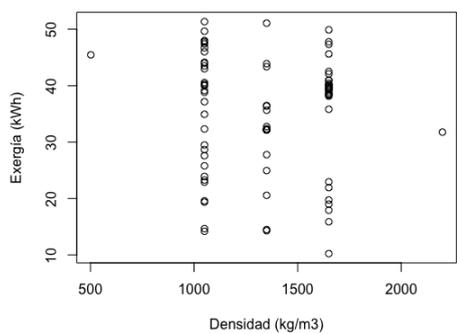
(b)



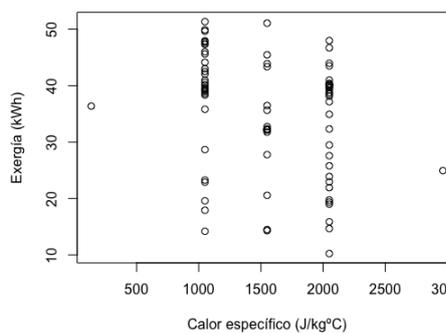
(c)



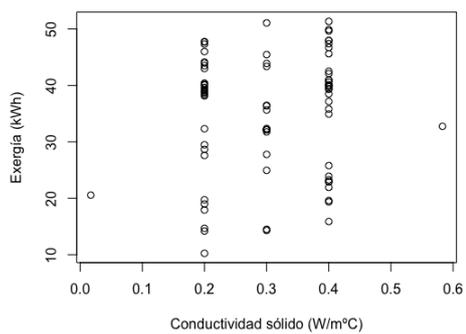
(d)



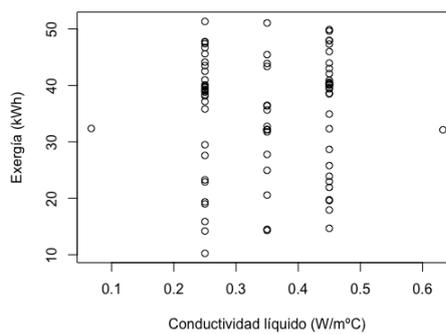
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 11.53: Evolución de la demanda de refrigeración con cada variable. Lote 2



	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	32.4828	1.4501	22.40	0.0000
A	-1.2765	0.6034	-2.12	0.0387
B	2.2767	0.6034	3.77	0.0004
C	2.1374	0.6034	3.54	0.0008
D	-0.9050	0.5960	-1.52	0.1343
E	-0.4998	0.6034	-0.83	0.4108
F	-2.8628	0.6034	-4.74	0.0000
A:B	1.1835	0.6746	1.75	0.0846
A:C	1.6135	0.6746	2.39	0.0200
A:D	0.9736	0.6746	1.44	0.1543
A:E	0.3079	0.6746	0.46	0.6498
A:F	0.0489	0.6746	0.07	0.9425
B:C	-1.3638	0.6746	-2.02	0.0478
B:D	-5.1003	0.6746	-7.56	0.0000
B:E	-4.0353	0.6746	-5.98	0.0000
B:F	-3.3557	0.6746	-4.97	0.0000
C:D	-1.1487	0.6746	-1.70	0.0939
C:E	-0.2681	0.6746	-0.40	0.6925
C:F	0.2863	0.6746	0.42	0.6728
D:E	-1.5752	0.6746	-2.34	0.0230
D:F	-1.4307	0.6746	-2.12	0.0382
E:F	-1.2275	0.6746	-1.82	0.0740
A^2	-1.9108	0.5137	-3.72	0.0005
B^2	1.3138	0.5137	2.56	0.0132
C^2	1.2275	0.5137	2.39	0.0201
D^2	1.0477	0.4586	2.28	0.0260
E^2	1.1164	0.5137	2.17	0.0339
R <sup>2</sup> múltiple		0.8083		
R <sup>2</sup> ajustado		0.7224		
Estadístico F		9.406 sobre 26 y 58		
Valor p		1.064e-12		

Tabla 11.54: Coeficientes de ajuste para la exergía de acondicionamiento del lote 2, mejorado

Para facilitar el análisis de las interacciones entre variables, se han representado para cada par de variables en las figuras 11.54 y 11.55. Para las variables no representadas en cada subfigura, se han tomado los valores de la tabla 11.55. Las figuras para la exergía de

$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (kJ/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	cp (J/kg·K)
5.05	21	200	0.02	1350	1550

Tabla 11.55: Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.54 y 11.55

acondicionamiento siguen la misma forma que las de la demanda de calefacción, en las figuras 11.39 y 11.40, en las páginas 263 y 264 respectivamente. Estos posiblemente se deba a que en las condiciones de invierno la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior son de media superiores que en verano, teniendo por lo tanto mayor valor exergético la energía de calefacción que la de refrigeración.

El intervalo de cambio de fase se presenta en las figuras 11.54a a 11.54e. En estas figuras se vuelve a apreciar la tendencia reducir la exergía de acondicionamiento aumentando el intervalo de cambio de fase, o disminuyéndolo, encontrándose los valores más elevados en la zona central de estudio. Como el intervalo de cambio de fase ha sido el elemento más analizado, con el aumento del lote 2, se ha representado la exergía de acondicionamiento en función del intervalo de temperaturas de cambio de fase en la figura 11.56, con los resultados del lote 2 de simulaciones en azul, y los del aumento del lote en verde. En la imagen se aprecia que los valores más bajos de la exergía se dan por debajo de 5 °C de intervalo, o por encima de 10 °C. De todos modos, la tendencia es muy leve, y no se dan grandes cambios en los valores de la demanda exergética.

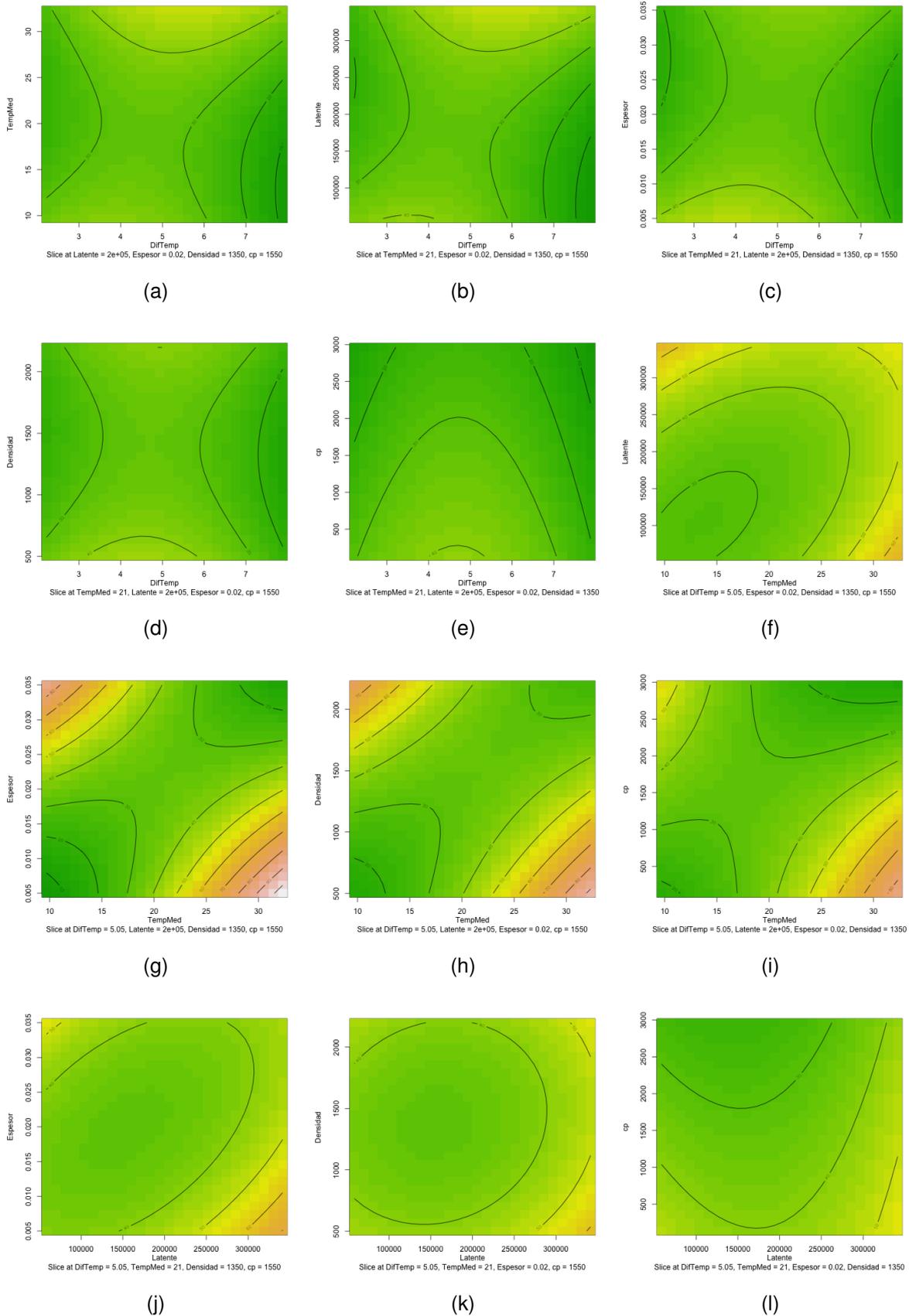


Figura 11.54: Relación entre las variables del modelo mejorado para la exergía de acondicionamiento, lote 2

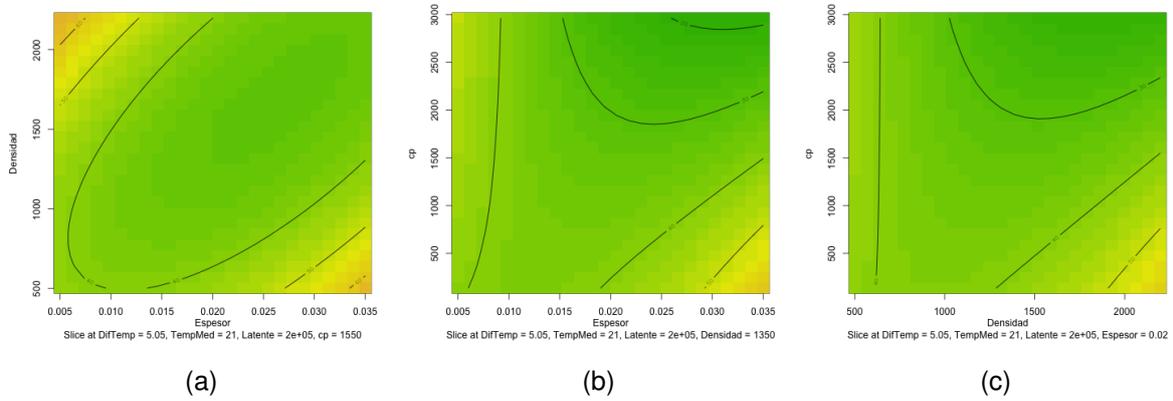


Figura 11.55: Relación entre las variables del modelo mejorado para la exergía de acondicionamiento, lote 2. Continuación

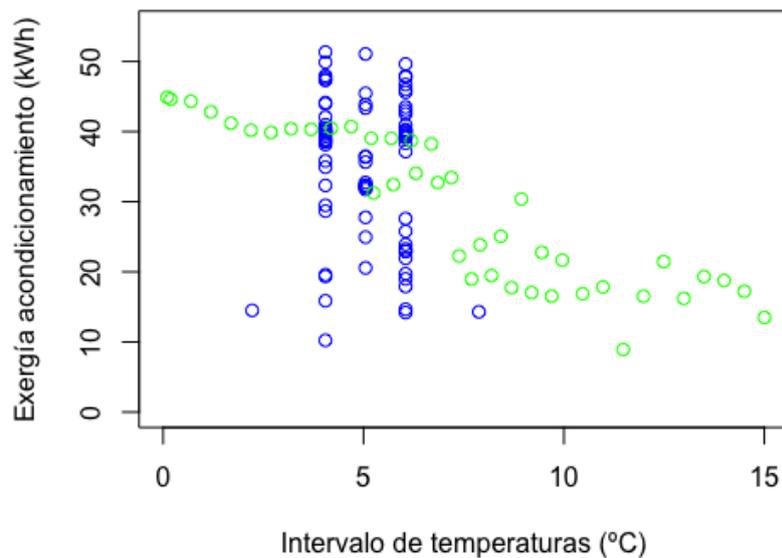


Figura 11.56: Exergía de acondicionamiento en función del intervalo de temperatura. Lote 2 y aumento del lote

La temperatura media de cambio de fase se presenta en las figuras 11.54a y 11.54f a 11.54i. Esta variable presenta valores de exergía de acondicionamiento bajos para una temperatura media por debajo de 15 °C, en su relación con el calor latente. Para el resto de variables, presenta un punto de silla con la exergía disminuyendo en hacia las esquinas. En vista del mal ajuste que suelen presentar estos modelos en las esquinas, se decide representar la exergía de acondicionamiento en función de la temperatura media de cambio de fase. La figura 11.57 presenta la demanda exergética en función de la temperatura media de cambio de fase, con los datos del lote 2 de simulaciones en azul, y el aumento del lote en verde. La tendencia en la

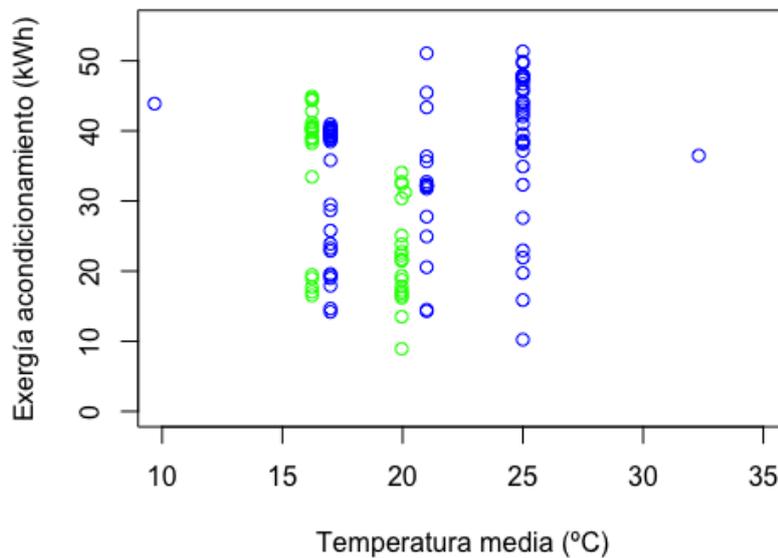


Figura 11.57: Exergía de acondicionamiento en función de la temperatura media de cambio de fase. Lote 2 y aumento del lote

imagen 11.57 no es del todo clara. Debido a que la transferencia de calor está muy ligada con la diferencia de temperaturas entre el muro y el aire interior, se decide representar también la exergía de acondicionamiento en función de la diferencia de temperaturas entre la temperatura media de cambio de fase y la temperatura interior del cubículo. Esta relación se representa en la figura 11.58. Los valores mínimos que aparecen en esta figura coinciden con los de la demanda de acondicionamiento: la simulación 34 del aumento del lote, y la simulación 24 del lote. La simulación 34 presenta una temperatura media 1.67 °C por debajo de la media del interior del cubículo, mientras que la simulación 24 presenta una temperatura media de cambio de fase 3 °C por encima de la temperatura media del interior. Parece por lo tanto que esa diferencia de temperaturas se puede dar en ambos sentidos, bien por encima de la temperatura media interior, como por debajo.

El calor latente de cambio de fase se representa en las figuras 11.54b, 11.54f y 11.54j a 11.54l. Para todas las variables, parece que los menores valores de la exergía de acondicio-

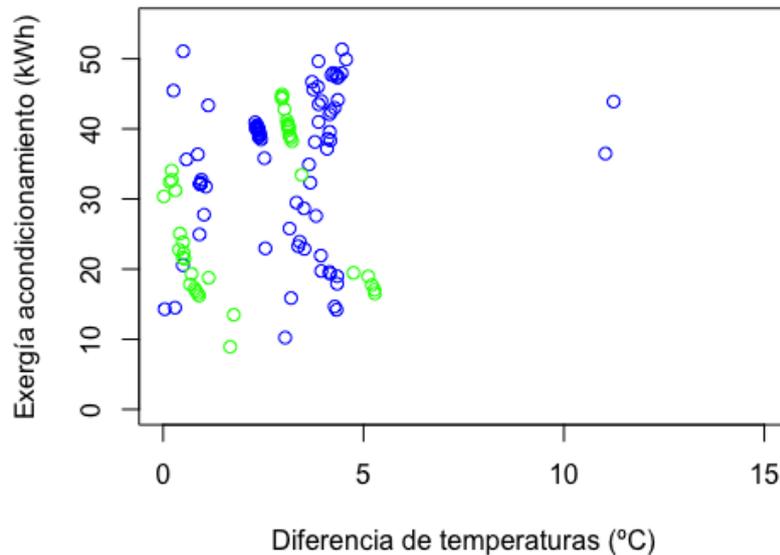


Figura 11.58: Exergía de acondicionamiento en función de la diferencia de temperaturas entre la temperatura media de cambio de fase, y la temperatura media interior. Lote 2 y aumento del lote

namiento se presentan para calores latentes en la zona media y baja del lote de simulaciones. Se ha representado la exergía de acondicionamiento en función del calor latente en la figura 11.59, con los datos del lote 2 en azul, y los del aumento del lote en verde. Efectivamente, se pueden ver mejores resultados para los valores de 150 kJ/kg y 200 kJ/kg, aunque curiosamente el valor mínimo de la exergía de acondicionamiento del lote 2 se da para un calor latente de 250 kJ/kg. Se trata de la simulación 24 del lote 2. El siguiente valor de la exergía con calor latente de 250 kJ/kg, duplica al de la simulación 24, con lo que se puede concluir que para esta configuración en concreto tienen más influencia el resto de las variables que el calor latente en sí.

El espesor se representa en las figuras 11.54c, 11.54g, 11.54j, 11.55a y 11.55b. La tendencia no está clara para esta variable, puesto que para algunas variables parece interesante que adopte valores altos o bajos, mientras que para otras variables parece indicar que son más adecuados los valores medios del espesor. Para clarificar más las tendencia, se ha representado la demanda exergética en función del espesor en la figura 11.60 Para el lote 2, con los datos en azul, se aprecia una tendencia a disminuir la exergía de acondicionamiento al aumentar el espesor de la capa de PCM. Pero al añadir los datos del aumento de simulación, también se aprecia que para el espesor de 20 mm se obtienen buenos resultados, incluso ligeramente mejores que los del lote 2. Parece indicar por lo tanto que los mejores resultados se obtienen para espesores entre 20 y 25 mm.

La densidad se representa en las figuras 11.54d, 11.54h, 11.54k, 11.55a y 11.55c. En prin-

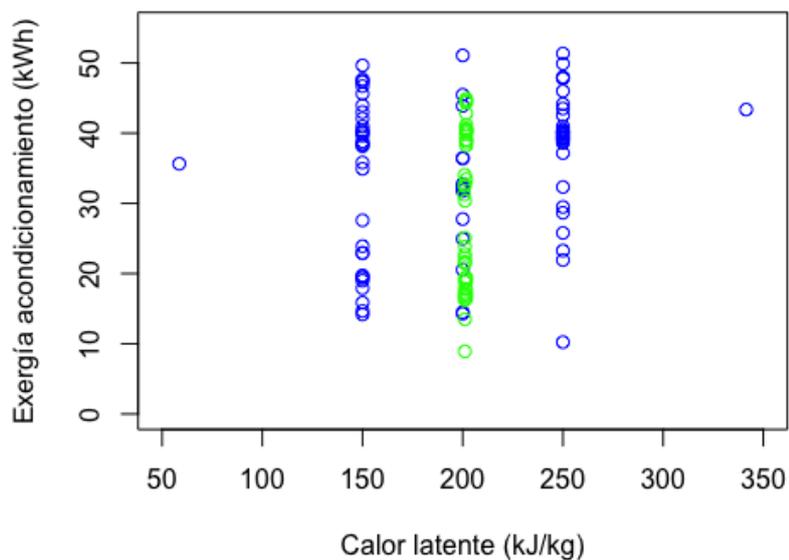


Figura 11.59: Exergía de acondicionamiento en función del calor latente. Lote 2 y aumento del lote

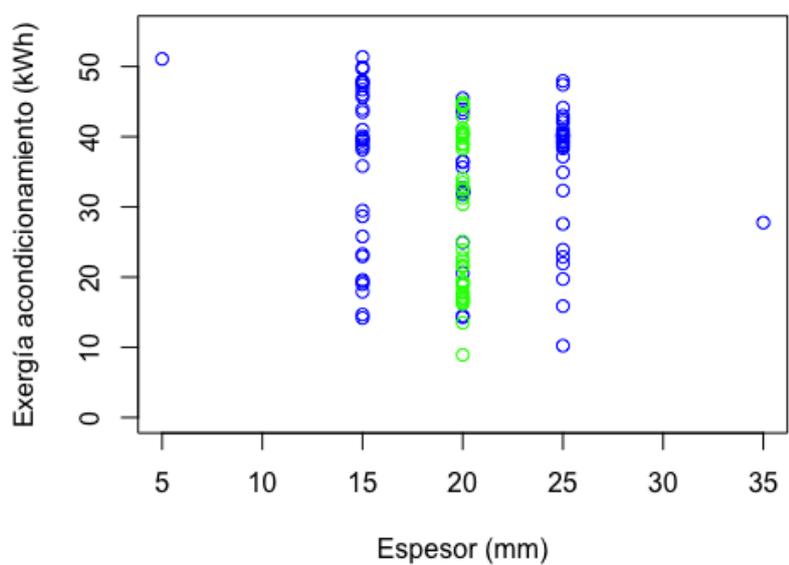


Figura 11.60: Exergía de acondicionamiento en función del espesor. Lote 2 y aumento del lote

cipio parece presentar mejores resultados en la zona media de simulación, aunque en alguna de las relaciones, como con la temperatura media (figura 11.54h), el espesor (figura 11.55a) o el calor específico (figura 11.55c) también muestra buenos resultados en la zona de densidades altas. De todos modos, estos últimos aparecen siempre en una de las esquinas del gráfico, por lo que es necesario analizarlos con mayor detenimiento. Por ello, se ha representado la exergía de acondicionamiento en función de la densidad en la figura 11.61. Tal y como

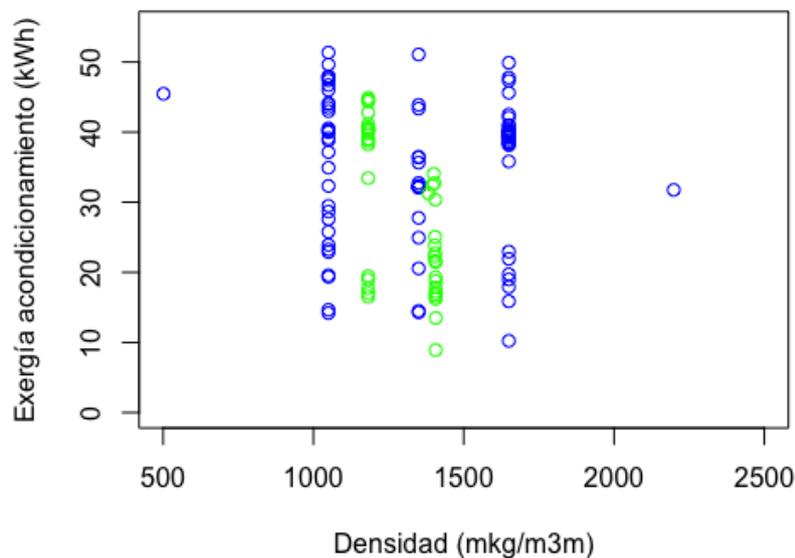


Figura 11.61: Exergía de acondicionamiento en función de la densidad. Lote 2 y aumento del lote

se puede apreciar en esta figura, los valores más bajos de la demanda exergética se dan en la zona media, con valores en torno a  $1500 \text{ kg/m}^3$ .

Finalmente para el calor específico, este se ha representado en las figuras 11.54e, 11.54i, 11.54l, 11.55b y 11.55c. En todas ellas la tendencia es clara a obtener mejores resultados para valores más elevados del calor específico.

Como conclusión, la demanda de exergía, se observa una reducción de su valor cuando se emplean materiales de cambio de fase puros, o con intervalos de cambio de fase superiores a  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ , calor latente entre  $150 \text{ kJ/kg}$  y  $200 \text{ kJ/kg}$ , temperaturas medias cercanas a la del interior del cubículo, espesores entre  $20$  y  $25 \text{ mm}$ , densidad en torno a  $1500 \text{ kg/m}^3$  y calor específico alto.

#### 11.2.3.10. PCM interior. Transmitancia exergética

La transmitancia exergética presenta también un muy buen comportamiento al incluir el material de cambio de fase en el interior del cerramiento, tal y como se observa en el diagrama

de caja de la figura 11.6, de la página 198. Se aprecia incluso algunos valores atípicos para los que la transmitancia exérgica es negativa. Estos valores están relacionado con demandas exérgicas muy bajas, con lo que posiblemente se deban al error inherente al propio algoritmo de simulación. Los valores mínimos de la transmitancia exérgica se dan para las simulaciones 24, 47 y 83, para las que los valores de las variables se han representado en la tabla 11.56.

ID	$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (J/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)	$k_{liq}$ (W/m·K)
24	4.05	25.00	250000	0.025	1650	2050	0.200	0.250
47	4.05	25.00	150000	0.025	1650	2050	0.400	0.250
83	7.88	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350

Tabla 11.56: Propiedades de simulación para el valor mínimo de la transmitancia exérgica

Las tablas 11.57 y 11.58 representan los coeficientes y parámetros de ajuste de primer y segundo orden respectivamente. Tal y como se puede apreciar, el modelo de primer orden presenta un ajuste deficiente, mientras que el modelo de segundo orden presenta coeficientes asumibles, tanto para los coeficientes  $R^2$ , como para el estadístico  $F$  y el valor  $p$ .

Como viene sucediendo en las configuraciones con el PCM por el interior, las conductividades no presentan una significatividad importante en el valor de la transmitancia exérgica. En este caso tampoco la densidad presenta un peso notable, con valores de probabilidad  $Pr(>|t|)$  por encima del valor de corte en todos sus elementos.

Por ese motivo, se procede a rehacer el modelo eliminando los elementos de menor significatividad que permitan mejorar el ajuste. Se ha buscado mejorar sobre todo el coeficiente  $R^2$  ajustado, que pondera no sólo en función del ajuste absoluto, puesto que tiene en cuenta el número de elementos presentes en el modelo. Así se ha obtenido el ajuste mejorado que se presenta en la tabla Como se puede observar en el ajuste, la densidad (variable E) sigue presentando en general un ajuste pobre, pero no se ha eliminado del modelo porque prescindir de ella empeora el valor del coeficiente  $R^2$  ajustado.

Para completar el análisis de la influencia de cada variable, se ha representado gráficamente en la figura 11.62. Las interrelaciones que existen entre las variables, junto con los términos cuadráticos presentes en el modelo mejorado, provocan una gran dispersión en los resultados, que en parte desenmascara las tendencias que muestran las variables. Como ejemplo, analizando la influencia del intervalo de cambio de fase (figura 11.62a), parece haber una tendencia a disminuir la transmitancia al aumentar el intervalo, pero el valor menor de la transmitancia se da para un intervalo de tan sólo 4.05 °C. Algo similar sucede con el calor latente, (figura 11.62c). Respecto a la temperatura media de cambio de fase (figura 11.62b), no se observa una tendencia clara en este gráfico.

Para el resto de variables, las tendencias parecen más claras. La transmitancia parece disminuir al aumentar el espesor (figura 11.62d), la densidad (figura 11.62e) y el calor específico (figura 11.62f), y al disminuir ambas conductividades, la de estado sólido (figura 11.62g) y líquido (figura 11.62h).

Para profundizar en el análisis de las interrelaciones entre variables y los términos cuadráti-

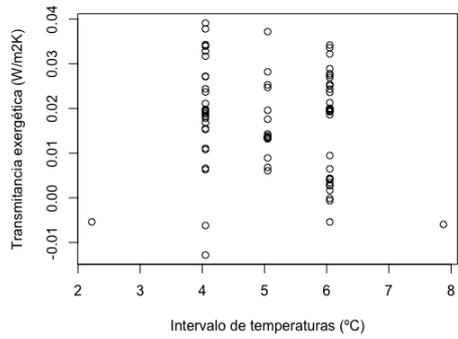


	Estimate	Std. Error	t value	Pr(>  t )
(Intercept)	0.0172	0.0011	15.55	0.0000
A	-0.0015	0.0011	-1.34	0.1854
B	0.0032	0.0011	2.86	0.0055
C	0.0022	0.0011	1.90	0.0610
D	-0.0014	0.0011	-1.28	0.2028
E	-0.0011	0.0011	-0.96	0.3381
F	-0.0036	0.0011	-3.21	0.0020
G	0.0005	0.0011	0.42	0.6792
H	0.0002	0.0011	0.14	0.8873
R <sup>2</sup> múltiple			0.2593	
R <sup>2</sup> ajustado			0.1814	
Estadístico F			3.326 sobre 8 y 76	
Valor p			0.00259	

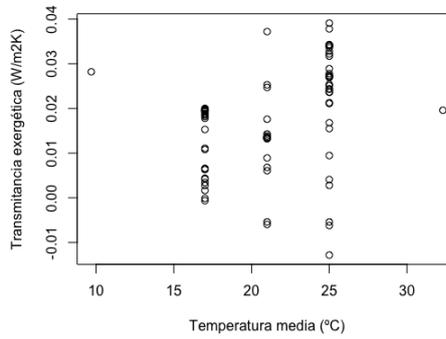
Tabla 11.57: Coeficientes de ajuste para la transmitancia exergética del lote 2, de primer orden

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(>  t )
(Intercept)	0.0136	0.0031	4.45	0.0001
A	-0.0015	0.0008	-1.98	0.0544
B	0.0032	0.0008	4.24	0.0001
C	0.0022	0.0008	2.82	0.0074
D	-0.0014	0.0008	-1.91	0.0640
E	-0.0011	0.0008	-1.43	0.1606
F	-0.0036	0.0008	-4.75	0.0000
G	0.0005	0.0008	0.62	0.5416
H	0.0002	0.0008	0.21	0.8341
A:B	0.0007	0.0009	0.77	0.4454
A:C	0.0018	0.0009	2.05	0.0471
A:D	0.0017	0.0009	1.93	0.0604
A:E	0.0006	0.0009	0.73	0.4704
A:F	0.0004	0.0009	0.42	0.6789
A:G	-0.0002	0.0009	-0.19	0.8526
A:H	-0.0015	0.0009	-1.76	0.0854
B:C	-0.0004	0.0009	-0.52	0.6087
B:D	-0.0044	0.0009	-5.16	0.0000
B:E	-0.0039	0.0009	-4.55	0.0000
B:F	-0.0043	0.0009	-5.05	0.0000
B:G	0.0003	0.0009	0.39	0.6973
B:H	0.0000	0.0009	0.01	0.9935
C:D	-0.0011	0.0009	-1.25	0.2193
C:E	0.0001	0.0009	0.09	0.9310
C:F	0.0004	0.0009	0.48	0.6310
C:G	0.0008	0.0009	0.99	0.3293
C:H	0.0003	0.0009	0.33	0.7454
D:E	-0.0014	0.0009	-1.66	0.1055
D:F	-0.0016	0.0009	-1.82	0.0761
D:G	-0.0002	0.0009	-0.26	0.7955
D:H	0.0006	0.0009	0.76	0.4543
E:F	-0.0015	0.0009	-1.70	0.0962
E:G	0.0000	0.0009	0.03	0.9798
E:H	0.0003	0.0009	0.35	0.7312
F:G	-0.0002	0.0009	-0.23	0.8172
F:H	-0.0003	0.0009	-0.35	0.7283
G:H	-0.0004	0.0009	-0.47	0.6399
A^2	-0.0020	0.0007	-2.92	0.0057
B^2	0.0017	0.0007	2.41	0.0206
C^2	0.0012	0.0007	1.67	0.1023
D^2	0.0014	0.0006	2.18	0.0351
E^2	0.0011	0.0007	1.52	0.1366
F^2	0.0002	0.0007	0.24	0.8146
G^2	-0.0001	0.0007	-0.08	0.9327
H^2	0.0004	0.0007	0.56	0.5764
R <sup>2</sup> múltiple			0.8228	
R <sup>2</sup> ajustado			0.6278	
Estadístico F			4.22 sobre 44 y 40	
Valor p			5.303e-06	

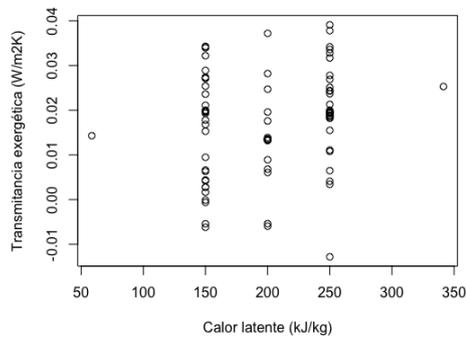
Tabla 11.58: Coeficientes de ajuste para la transmitancia exergética del lote 2, de segundo orden



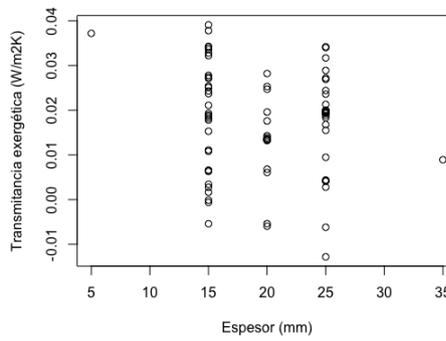
(a)



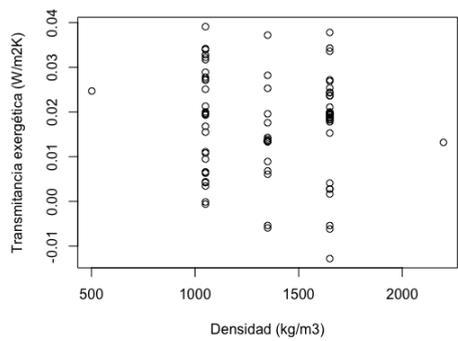
(b)



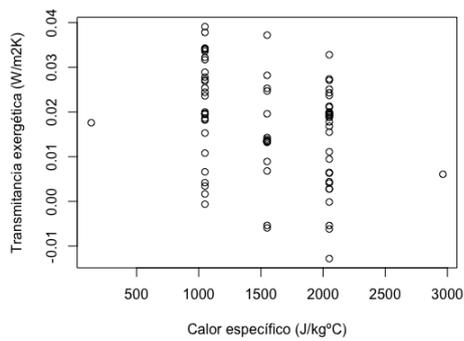
(c)



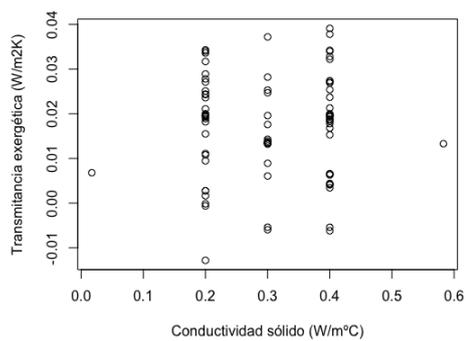
(d)



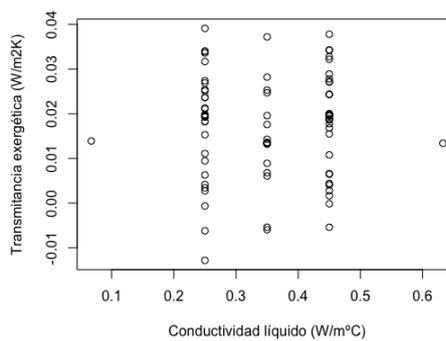
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 11.62: Evolución de la transmitancia exergética con cada variable. Lote 2



	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.0145	0.0017	8.59	0.0000
A	-0.0015	0.0007	-2.17	0.0339
B	0.0032	0.0007	4.64	0.0000
C	0.0022	0.0007	3.09	0.0030
D	-0.0014	0.0007	-2.08	0.0412
E	-0.0011	0.0007	-1.56	0.1227
F	-0.0036	0.0007	-5.20	0.0000
A:B	0.0007	0.0008	0.84	0.4022
A:D	0.0017	0.0008	2.11	0.0384
A:E	0.0006	0.0008	0.80	0.4282
A:F	0.0004	0.0008	0.46	0.6497
B:D	-0.0044	0.0008	-5.65	0.0000
B:E	-0.0039	0.0008	-4.98	0.0000
B:F	-0.0043	0.0008	-5.52	0.0000
D:E	-0.0014	0.0008	-1.81	0.0747
D:F	-0.0016	0.0008	-1.99	0.0506
E:F	-0.0015	0.0008	-1.86	0.0669
A^2	-0.0021	0.0006	-3.52	0.0008
B^2	0.0016	0.0006	2.67	0.0097
C^2	0.0011	0.0006	1.81	0.0751
D^2	0.0013	0.0005	2.41	0.0191
E^2	0.0010	0.0006	1.63	0.1077
R <sup>2</sup> múltiple			0.7669	
R <sup>2</sup> ajustado			0.6891	
Estadístico F			9.8682 sobre 21 y 63	
Valor p			6.744e-13	

Tabla 11.59: Coeficientes de ajuste para la transmitancia exergética del lote 2, mejorado

cos, se ha representado la interacción entre cada par de variables en las figuras 11.63 y 11.64. Para las variables no representadas en cada subfigura, se han tomado los valores de la tabla 11.55. Como se puede observar, las tendencias que apuntan cada variable son iguales que

$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (kJ/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	cp (J/kg·K)
5.05	21	200	0.02	1350	1550

Tabla 11.60: Valores de cálculo de las variables no representadas en las figuras 11.63 y 11.64

para la demanda exergética, con lo que no se requiere mayor análisis. La transmitancia parece disminuir cuando se emplean materiales de cambio de fase puros, o con intervalos de cambio de fase superiores a 5 °C, un calor latente medio-alto, entre 150 kJ/kg y 200 kJ/kg, temperaturas medias cercanas a la del interior del cubículo, espesores entre 20 y 25 mm, densidad en torno a 1500 kg/m<sup>3</sup> y calor específico alto.

### 11.3. Conclusiones

Una vez analizados todos los parámetros para cada configuración, hay unas cuantas conclusiones que se pueden sacar con respecto al uso de los materiales de cambio de fase en los cerramientos de edificación:

- El comportamiento de los PCM es notablemente mejor cuando se pone en el interior, en contacto directo con la zona a acondicionar, que situado en el exterior. En el exterior el cambio de fase apenas aporta ninguna ventaja, y por lo general es mejor el empleo de un aislamiento convencional, aunque sólo sea por su menor coste

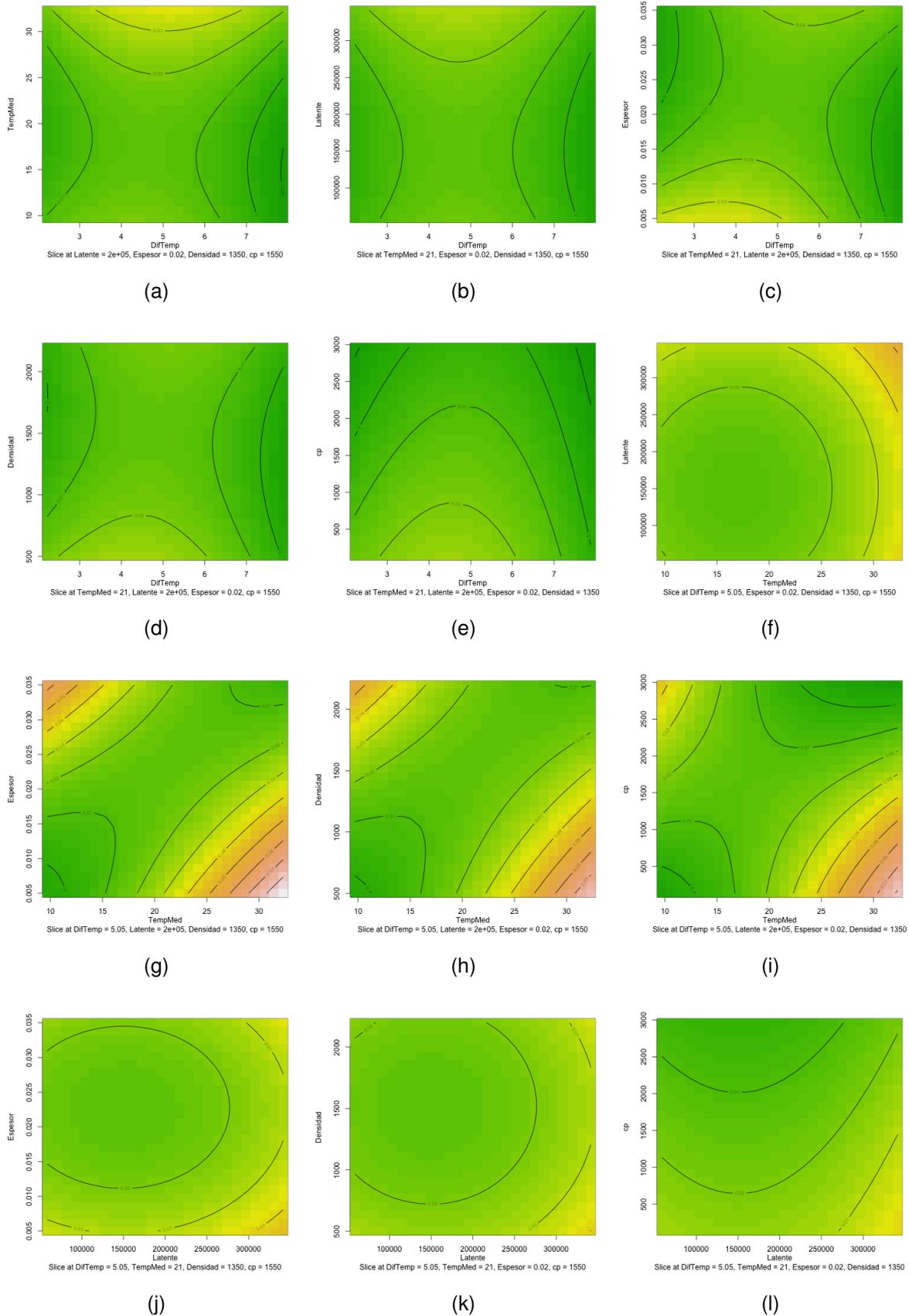


Figura 11.63: Relación entre las variables del modelo mejorado para la transmitancia exergética, lote 2

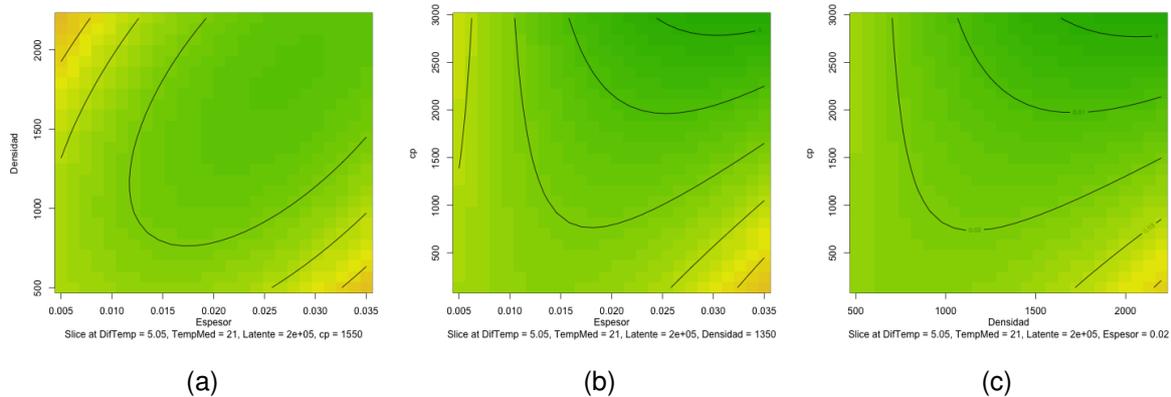


Figura 11.64: Relación entre las variables del modelo mejorado para la transmitancia exergética, lote 2. Continuación

- De todos modos, cuando el objetivo principal sea la reducción de la demanda de refrigeración, el uso de los materiales de cambio de fase por el exterior sí presenta un comportamiento ligeramente superior al aislamiento convencional, con lo que puede ser una opción a tener en cuenta
- La adición de un material de cambio de fase en el interior del cerramiento sí presenta una mejora importante en todos los parámetros analizados, tanto respecto a la adición de PCM por el exterior, como respecto a los aislamientos convencionales
- Al contrario de lo propuesto normalmente, que apunta a un mejor comportamiento de los PCMs con un intervalo de temperaturas de cambio de fase lo más estrecho posible, las simulaciones realizadas también obtienen buenos resultados cuando se amplía ese intervalo por encima de los 5 °C, hasta cubrir por completo el intervalo de fluctuación de la temperatura del interior del cubículo
- La mayor mejoría se consigue en la reducción de la demanda de refrigeración con el PCM por el interior, llegando casi a eliminarse por completo la necesidad de refrigeración
- El valor óptimo para la temperatura media de cambio de fase coincide con la temperatura media del interior del cubículo si se tiene en cuenta sólo la demanda total, como suma de las demandas de calefacción y refrigeración. Sin embargo, al analizar calefacción y refrigeración por separado, se ve que es de mayor interés desplazar la temperatura de cambio de fase por encima o por debajo de la temperatura media del interior del cubículo
- Los valores óptimos de los materiales de cambio de fase para reducir la demanda de calefacción, la de refrigeración, o la total, no coinciden. Esto significa que la elección del material más adecuado va a responder sobre todo a las necesidades reales del emplazamiento, y al valor que asignemos a cada uno de los parámetros. No es lo mismo por ejemplo cuantificar la demanda total de energía final, o de energía primaria, puesto que



los factores de conversión entre ambos tipos pueden hacer que se refuerce más el peso de la calefacción o la refrigeración



## Capítulo 12

# Conclusiones y trabajo futuro

---

12.1. Conclusiones . . . . .	296
12.2. Propuestas de trabajo futuro . . . . .	298

---



En el presente trabajo se ha querido analizar de forma sistemática el comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase en los cerramientos de edificios. Para ello se han analizado todas las fases de interés de un proyecto para la inclusión de estos materiales, desde la propuesta de métodos de ensayo, pasando por métodos de cálculo, hasta el análisis de los valores óptimos que consiguen minimizar la demanda energética de un edificio, para una aplicación concreta.

En el presente capítulo se van a resumir las conclusiones que se han obtenido de este amplio trabajo, tanto en cuanto a la metodología de medición, métodos de simulación, y propiedades de los materiales de cambio de fase.

Para terminar, se van a apuntar una serie de propuestas de trabajo futuro para seguir profundizando en el análisis del comportamiento de los materiales de cambio de fase en los cerramientos de edificios.

## 12.1. Conclusiones

En la presente tesis se ha analizado todo el proceso de diseño y definición de materiales de cambio de fase para su inclusión en los cerramientos de edificios. Para ello se ha planteado un nuevo método de ensayo de materiales, se han comparado dos métodos de simulación del comportamiento térmico de los PCMs, y finalmente se ha desarrollado un algoritmo de cálculo para estudiar los valores óptimos de las propiedades termofísicas de estos materiales para su aplicación en un caso concreto, un cerramiento orientado al sur en la ciudad de Vitoria-Gasteiz.

Respecto a los métodos de cálculo, las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- El método DSC es adecuado para definir la relación entre temperatura y entalpía para los materiales de cambio de fase. Como inconveniente, debido al pequeño tamaño de muestra, este método no permite el ensayo de materiales que presenten una gran heterogeneidad.
- El conductímetro permite realizar ensayos flexibles, con diferentes temperaturas de ensayo, velocidades de transferencia de calor, e incluso permite el ensayo de materiales heterogéneos. Además, este método permite la medición de la conductividad de los materiales a distintos niveles de temperatura, y por lo tanto su medición tanto para el estado sólido como para el líquido. En caso de faltar el valor de alguna de las propiedades del material, se podrían usar también los valores del ensayo para hallar su valor mediante ajuste. Como inconveniente, el sistema de control del conductímetro empleado no permite una gran flexibilidad a la hora de diseñar el método de ensayo.

Respecto a los métodos de simulación, se han comparado dos métodos distintos, con las siguientes conclusiones:

- El método en diferencias finitas explícito se ha usado ampliamente por varios autores. En el presente estudio, se ha modificado el método para incluir directamente los resultados

del ensayo DSC, sin tener que modificar la curva entalpía-temperatura, como suelen hacer la mayoría de métodos. El método desarrollado presenta un buen ajuste respecto a los datos experimentales del ensayo del conductímetro, con un error medio en torno al 3 %. Además este método es bastante robusto respecto a pequeñas variaciones de las propiedades termofísicas, con desviaciones inferiores al 5 %. Como ventaja adicional, este método presenta un tiempo de cálculo aceptable, necesitando alrededor de 40 minutos para la simulación de un año completo del cubículo planteando en el capítulo 10.

- El método de redes neuronales se ha planteado como una alternativa a los métodos tradicionales de cálculo del comportamiento térmico de los materiales de cambio de fase. Este método presenta un ajuste muy bueno a los resultados experimentales del ensayo de conductímetro, además de presentar tiempos de cálculo muy reducidos. El problema que presenta este método es su mala generalización, por lo que a pesar del buen ajuste que presenta sobre los datos de ensayo, no es capaz de obtener resultados coherentes cuando se intenta simular situaciones diferentes a las del ensayo.
- En vista de las ventajas que presenta el método de diferencias finitas, se ha programado un algoritmo que simula el comportamiento térmico de un cubículo completo con inclusión de PCMs. Este método presenta la suficiente flexibilidad como para poder ajustarse a distintos perfiles de uso interior, cargas internas, orientaciones, o tipologías de cerramientos.

Respecto a las propiedades de los materiales de cambio de fase, se ha analizado su inclusión en un cerramiento orientado al sur en la ciudad de Vitoria-Gasteiz, comparando su inclusión en el exterior y en el interior del cerramiento. Respecto a este análisis, las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- El material de cambio de fase no aporta ninguna ventaja cuando se sitúa por el exterior, si se compara con la adición de un aislamiento convencional.
- La inclusión de un material de cambio de fase en el interior del cerramiento presenta una clara ventaja, presentando mejor comportamiento que los materiales convencionales.
- Los materiales de cambio de fase presentan un buen comportamiento cuando son materiales puros, con un cambio de fase estrecho, pero también presentan un comportamiento correcto cuando el intervalo de cambio de fase abarca toda la amplitud de variación de temperaturas del aire interior.
- Las propiedades óptimas de los materiales para reducir la demanda de calefacción y de refrigeración difieren, con lo que en función del peso que se le de a cada uno de los modos de acondicionamiento, las propiedades óptimas variarán para la reducción de la demanda final.



## 12.2. Propuestas de trabajo futuro

Esta tesis ha profundizado en el análisis de propiedades de los materiales de cambio de fase para su inclusión en los cerramientos de edificios. De todos modos, a lo largo del trabajo realizado, se han encontrado elementos que precisan de un análisis mayor, y que debido a que quedaban fuera del alcance inicial planteado, se han dejado para el trabajo futuro:

- Mejora del método de ensayo en conductivímetro: como se ha comentado, el conductivímetro empleado no permite suficiente flexibilidad en la definición de la evolución de temperaturas de la muestra. Por ello, se plantea la posibilidad de modificar el sistema de control del conductivímetro, o caso de no ser posible, diseñar una máquina de ensayo similar que permita un mejor control de las temperaturas de ensayo.
- Mejora del método en diferencias finitas: la mayor diferencia entre los valores experimentales y los resultados de simulación se presenta durante el cambio de fase. Por eso se plantea mejorar el método de cálculo durante el cambio de fase, implementando por ejemplo distintas curvas entalpía-temperatura para solidificación y fusión, y el caso de solidificaciones y fusiones parciales.
- En paralelo con la mejora del método de ensayo del conductivímetro y del método de diferencias finitas, plantear la posibilidad de usar los datos del conductivímetro para la medición de propiedades del PCM que no se puedan obtener con el equipamiento disponible. Con un método de simulación con un buen ajuste, se podrían obtener las propiedades desconocidas a través de métodos de regresión.
- Análisis de otros algoritmos de aprendizaje automático: se ha empleado el método de redes neuronales por ser este el de más amplia aplicación hoy en día. De todos modos, existen otros métodos dentro de los algoritmos de aprendizaje automático, como las redes bayesianas, o las máquinas de vectores de soporte.
- Alternativamente, analizar la posibilidad de emplear los métodos de aprendizaje automático para obtener directamente el valor de los parámetros analizados, como las demandas de calefacción y refrigeración. Esto requiere la definición previa de los indicadores climáticos más relevante, y el empleo de redes complejas de aprendizaje.
- Inclusión de criterios de análisis adicionales, como criterios económicos, ambientales, o capacidad total de almacenamiento térmico.
- Análisis de configuraciones adicionales de muros, tanto distintas tipologías del cerramiento exterior, como la inclusión de materiales de cambio de fase en cerramientos interiores verticales y horizontales.
- Análisis de propiedades óptimas para otros emplazamientos con distinta climatología y otras orientaciones del cerramiento con inclusión de PCM.

# Bibliografía

- [1] International Energy Agency, “Key World Energy Statistics 2015,” tech. rep., 2015.
- [2] British Petroleum, “BP Statistical Review of World Energy June 2015,” Tech. Rep. June, 2015.
- [3] World Resources Institute, “CAIT Climate Data Explorer.”
- [4] IEA, “World Energy Outlook 2012,” tech. rep., 2012.
- [5] IEA, “Key World Energy Statistics 2012,” tech. rep., 2012.
- [6] Minetur, “La Energía en España 2010,” pp. 1–347, 2011.
- [7] Comisión Europea, “Eurostat.”
- [8] Comisión Europea, “Hoja de Ruta de la Energía para 2050,” 2011.
- [9] Parlamento Europeo y Consejo de las comunidades Europeas, “Directiva 2009/28/Ce Del Parlamento Europeo Y Del Consejo,” 2009.
- [10] Parlamento Europeo y Consejo de las comunidades Europeas, “Decisión no 406/2009/CE sobre el esfuerzo de los Estados miembros para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero a fin de cumplir los compromisos adquiridos por la Comunidad hasta 2020,” 2009.
- [11] Minetur, “Informe Sobre El Objetivo Nacional De Eficiencia,” tech. rep., 2013.
- [12] Parlamento Europeo y Consejo de las comunidades Europeas, “DIRECTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios,” 2010.
- [13] Ministerio de Fomento, “Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Basico DB-HE ”Ahorro de Energia”,” 2013.
- [14] Ministerio de la Presidencia, “Real Decreto 235 / 2013 , de 5 de abril , por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética,” 2013.



- [15] P. G. Kroeger and S. Ostrach, "The Solution of a Two-Dimensional Freezing Problem Including Convection Effects in the Liquid Region," *International Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 17, pp. 1191–1207, 1974.
- [16] R. Tavakoli and P. Davami, "Unconditionally Stable Fully Explicit Finite Difference Solution of Solidification Problems," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 38, no. 1, pp. 121–142, 2007.
- [17] E. Sparrow, S. Patankar, and S. Ramadhyani, "Analysis of Melting in the Presence of Natural Convection in the Melt Region," *Journal Of Heat Transfer-Transactions Of The Asme*, vol. 99, pp. 520–526, 1977.
- [18] B. Zalba, J. Marin, L. F. Cabeza, and H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 251–283, 2003.
- [19] I. Lyons and L. Russell, "Phase-Change Materials And Thermal Design," *Ashrae Journal-American Society Of Heating Refrigerating And Air-Conditioning Engineers*, vol. 19, no. 9, pp. 47–50, 1977.
- [20] M. K. Rathod and J. Banerjee, "Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 246–258, 2013.
- [21] L. Royon, G. Guiffant, F. Trinquet, and P. Perrot, "Comparison Between Aqueous Polymer Solutions and Water as Phase Change Material (PCM) Used for Cold Transport Chain," *Experimental Heat Transfer*, vol. 18, no. 2, pp. 87–93, 2005.
- [22] B. Gin and M. M. Farid, "The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food," *Journal of Food Engineering*, vol. 100, no. 2, pp. 372–376, 2010.
- [23] A. Regin, S. Solanki, and J. Saini, "Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 9, pp. 2438–2458, 2008.
- [24] F. Kuznik, J. Virgone, and K. Johannes, "In-situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard," *Renewable Energy*, 2010.
- [25] D. Yoo and Y. Joshi, "Energy efficient thermal management of electronic components using solid-liquid phase change materials," *Ieee Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 4, no. 4, pp. 641–649, 2004.
- [26] V. Martin, B. He, and F. Setterwall, "Direct contact PCM, water cold storage," *Applied Energy*, vol. 87, no. 8, pp. 2652–2659, 2010.

- [27] B. Zalba, J. Marin, L. F. Cabeza, and H. Mehling, “Free-cooling of buildings with phase change materials,” *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, vol. 27, no. 8, pp. 839–849, 2004.
- [28] A. Waqas and Z. Ud Din, “Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings, A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 607–625, 2013.
- [29] T. Kousksou, P. Bruel, V. Leoussoff, and T. el Rhafiki, “PCM storage for solar DHW: From an unfulfilled promise to a real benefit,” *Solar Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 2033–202040, 2011.
- [30] P. Pinel, C. A. Cruickshank, I. Beausoleil-Morrison, and A. Wills, “A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 7, pp. 3341–3359, 2011.
- [31] X. Py, Y. Azoumah, and R. Olives, “Concentrated solar power: Current technologies, major innovative issues and applicability to West African countries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 306–315, 2013.
- [32] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lázaro, P. Dolado, B. Zalba, and L. F. Cabeza, “State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1, Concepts, materials and modellization,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 31–55, 2009.
- [33] BOE, “Codigo Tecnico de la Edificación. CTE.”
- [34] S. Pincemin, R. Olives, X. Py, and M. Christ, “Highly conductive composites made of phase change materials and graphite for thermal storage,” *Solar Energy Materials And Solar Cells*, vol. 92, no. 6, pp. 603–613, 2008.
- [35] D. Haillot, V. Goetz, X. Py, and M. Benabdelkarim, “High performance storage composite for the enhancement of solar domestic hot water systems,” *Solar Energy*, 2011.
- [36] M. Souliotis, S. Kalogirou, and Y. Tripanagnostopoulos, “Modelling of an ICS solar water heater using artificial neural networks and TRNSYS,” *Renewable Energy*, vol. 34, no. 5, pp. 1333–1339, 2009.
- [37] L. F. Cabeza, M. Ibanez, C. Sole, J. Roca, and M. Nogues, “Experimentation with a water tank including a PCM module,” *Solar Energy Materials And Solar Cells*, vol. 90, no. 9, pp. 1273–1282, 2006.
- [38] E. Cuce and P. M. Cuce, “A comprehensive review on solar cookers,” *Applied Energy*, vol. 102, pp. 1399–1421, 2013.



- [39] C. R. Chen, A. Sharma, S. K. Tyagi, and D. Buddhi, "Numerical heat transfer studies of PCMs used in a box-type solar cooker," *Renewable Energy*, vol. 33, no. 5, pp. 1121–1129, 2008.
- [40] V. Verda and F. Colella, "Primary energy savings through thermal storage in district heating networks," *Energy*, vol. 36, no. 7, pp. 4278–4286, 2011.
- [41] E. Foumeny and J. Ma, "Performance Prediction Of Cyclic Thermal Regenerators Utilizing Latent-Heat Of Packing Matrix," *Heat Recovery Systems and CHP*, vol. 15, no. 1, pp. 1–12, 1995.
- [42] A. Campos-Celador, G. Diarce, J. T. Zubiaga, T. V. Bandos, A. M. Garcia-Romero, L. M. Lopez, and J. M. Sala, "Design of a finned plate latent heat thermal energy storage system for domestic applications," *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 300–308, 2014.
- [43] T. Nomura, M. Tsubota, T. Oya, N. Okinaka, and T. Akiyama, "Heat storage in direct-contact heat exchanger with phase change material," *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, no. 1, pp. 26–34, 2013.
- [44] H. Mehling, S. Hiebler, and L. F. Cabeza, "News on the application of PCMs for heating and cooling of buildings," in *IEA, ECES IA, Annex 17, Advanced thermal energy storage through phase change materials and chemical reactions - Feasibility studies and demonstration projects, 3rd Workshop*, 2002.
- [45] M. J. Huang, P. C. Eames, S. McCormack, P. Griffiths, and N. J. Hewitt, "Microencapsulated phase change slurries for thermal energy storage in a residential solar energy system," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 2932–2939, 2011.
- [46] I. E. Abbassi, J. Castaing-Lasvignottes, J.-P. Bedecarrats, J.-P. Dumas, and E. A. Mimet, "Energetic performances of a refrigerating loop using ice slurry," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 8-9, pp. 962–969, 2010.
- [47] Z. G. Qu, W. Q. Li, J. L. Wang, and W. Q. Tao, "Passive thermal management using metal foam saturated with phase change material in a heat sink," *International Communications In Heat And Mass Transfer*, vol. 39, no. 10, pp. 1546–1549, 2012.
- [48] T. Fiedler, J. Loosemore, I. V. Belova, and G. E. Murch, "A comparative study of heat sink composites for temperature stabilisation," *Applied Thermal Engineering*, vol. 58, no. 1-2, pp. 314–320, 2013.
- [49] X. Duan and G. F. Naterer, "Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules," *International Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 53, no. 23-24, pp. 5176–5182, 2010.
- [50] M. Jun Huang, "The effect of using two PCMs on the thermal regulation performance of BIPV systems," *Solar Energy Materials And Solar Cells*, vol. 95, no. 3, pp. 957–963, 2011.

- [51] O. Laguerre, M. Benaissa, and D. Flick, "Methodology of temperature prediction in an insulated container equipped with PCM," *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, vol. 31, no. 6, pp. 1063–1072, 2008.
- [52] K. Azzouz, D. Leducq, and D. Gobin, "Enhancing the performance of household refrigerators with latent heat storage: an experimental investigation," *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, 2009.
- [53] A. Bejan, "Two thermodynamic optima in the design of sensible heat units for energy storage," *Journal Of Heat Transfer-Transactions Of The Asme*, vol. 100, pp. 708–712, 1978.
- [54] W. A. Qureshi, N.-K. C. Nair, and M. M. Farid, "Impact of energy storage in buildings on electricity demand side management," *Energy Conversion And Management*, vol. 52, no. 5, pp. 2110–2120, 2011.
- [55] B. Zalba, *Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Procedimiento experimental*. PhD thesis, Universidad de Zaragoza, 2002.
- [56] A. Lazaro, P. Dolado, J. Marin, and B. Zalba, "PCM-air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: Empirical model and application to design," *Energy Conversion And Management*, vol. 50, no. 3, pp. 444–449, 2009.
- [57] A. Lazaro, P. Dolado, J. Marin, and B. Zalba, "PCM-air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: Experimental results of two real-scale prototypes," *Energy Conversion And Management*, vol. 50, no. 3, pp. 439–443, 2009.
- [58] P. Dolado, *Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Diseño y modelización de equipos de almacenamiento para intercambio de calor con aire*. PhD thesis, 2011.
- [59] V. A. Aroul Raj and R. Velraj, "Review on free cooling of buildings using phase change materials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 2819–2829, 2010.
- [60] N. Bukovec, P. Bukovec, and V. Arbanas, "Tg And Dsc Investigation Of CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, A Phase-Change Material For Energy-Storage," *Thermochimica Acta*, vol. 148, pp. 281–288, 1989.
- [61] J. A. Molefi, A. S. Luyt, and I. Krupa, "Comparison of LDPE, LLDPE and HDPE as matrices for phase change materials based on a soft Fischer-Tropsch paraffin wax," *Thermochimica Acta*, vol. 500, no. 1-2, pp. 88–92, 2010.
- [62] G.-Z. Ke, H.-F. Xie, R.-P. Ruan, and W.-D. Yu, "Preparation and performance of porous phase change polyethylene glycol/polyurethane membrane," *Energy Conversion And Management*, vol. 51, no. 11, pp. 2294–2298, 2010.



- [63] X. Zhang, X. Tao, K. Yick, and X. Wang, "Structure and thermal stability of microencapsulated phase-change materials," *Colloid And Polymer Science*, vol. 282, no. 4, pp. 330–336, 2004.
- [64] Y. Cai, Q. Wei, F. Huang, S. Lin, F. Chen, and W. Gao, "Thermal stability, latent heat and flame retardant properties of the thermal energy storage phase change materials based on paraffin/high density polyethylene composites," *Renewable Energy*, 2009.
- [65] W. Li, G. Song, G. Tang, X. Chu, S. Ma, and C. Liu, "Morphology, structure and thermal stability of microencapsulated phase change material with copolymer shell," *Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 785–791, 2011.
- [66] Y. Zhang and Y. Jiang, "A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials," *Measurement in Science Technologies*, vol. 10, no. 3, pp. 201–205, 1999.
- [67] H. Hong, C. H. Park, J. Choi, and J. Peck, "Improvement of the T-History method to measure heat of fusion for phase change materials," *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, vol. 11, no. 1, pp. 32–39, 2003.
- [68] H. Hong, S. Kim, and Y.-S. Kim, "Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials," *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, vol. 27, no. 4, pp. 360–366, 2004.
- [69] J. H. Peck, J.-J. Kim, C. Kang, and H. Hong, "A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method," *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, vol. 29, no. 7, pp. 1225–1232, 2006.
- [70] A. Lazaro, E. Gunther, H. Mehling, S. Hiebler, J. Marin, and B. Zalba, "Verification of a T-history installation to measure enthalpy versus temperature curves of phase change materials," *Measurement in Science Technologies*, vol. 17, no. 8, pp. 2168–2174, 2006.
- [71] F. Agyenim, P. Eames, and M. Smyth, "Experimental study on the melting and solidification behaviour of a medium temperature phase change storage material (Erythritol) system augmented with fins to power a LiBr/H<sub>2</sub>O absorption cooling system," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 108–117, 2011.
- [72] Z. G. Wu and C. Y. Zhao, "Experimental investigations of porous materials in high temperature thermal energy storage systems," *Solar Energy*, vol. 85, no. 7, pp. 1371–1380, 2011.
- [73] A. C. Evers, M. A. Medina, and Y. Fang, "Evaluation of the thermal performance of frame walls enhanced with paraffin and hydrated salt phase change materials using a dynamic wall simulator," *Building And Environment*, vol. 45, no. 8, pp. 1762–1768, 2010.

- [74] G. Diarce, A. Urresti Gonzalez, A. García-Romero, A. Delgado, A. Erkoreka, C. Escudero, and A. Campos Celador, "Ventilated active façades with PCM," *Applied Energy*, vol. 109, pp. 530–537, 2013.
- [75] W. D. Murray and F. Landis, "Numerical and Machine Solutions of Transient Heat-Conduction Problems Involving Melting or Freezing. Part I - Method of Analysis and Sample Solutions," *Journal Of Heat Transfer-Transactions Of The Asme*, pp. 106–112, 1959.
- [76] H. Carslaw and J. Jaeger, *Conduction of heat in solids*. Oxford University Press, 1959.
- [77] M. Rappaz, "Modelling of microstructure formation in solidification processes," *International Materials Reviews*, vol. 34, no. 1, pp. 93–124, 1989.
- [78] M. Hamdan and F. Elwerr, "Thermal energy storage using a phase change material," *Solar Energy*, vol. 56, no. 2, pp. 183–189, 1996.
- [79] B. W. Webb and R. Viskanta, "Analysis of heat transfer during melting of a pure metal from an isothermal vertical wall," *Numerical Heat Transfer Part A-Applications*, vol. 9, no. 5, pp. 539–558, 1986.
- [80] L. S. Yao and F. F. Chen, "Effects of Natural Convection in the Melted Region Around a Heated Horizontal Cylinder," *Journal Of Heat Transfer-Transactions Of The Asme*, vol. 102, pp. 667–672, 1980.
- [81] M. Costa, D. Buddhi, and A. Oliva, "Numerical simulation of a latent heat thermal energy storage system with enhanced heat conduction," *Energy Conversion And Management*, vol. 39, no. 3-4, pp. 319–330, 1998.
- [82] M. Zukowski, "Mathematical modeling and numerical simulation of a short term thermal energy storage system using phase change material for heating applications," *Energy Conversion And Management*, vol. 48, no. 1, pp. 155–165, 2007.
- [83] N. Shamsundar and E. Sparrow, "Effect of Density Change on Multidimensional Conduction Phase Change," *Journal Of Heat Transfer-Transactions Of The Asme*, vol. 98, no. 4, pp. 550–557, 1976.
- [84] T. R. Goodman, "The Heat-Balance Integral and its Application to Problems Involving a Change of Phase," *Transactions of ASME Journal*, vol. 80, pp. 335–342, 1958.
- [85] J. Crank, "How to Deal with Moving Boundaries in Thermal Problems," pp. 177–200, *Numerical Methods in Heat Transfer*, 1981.
- [86] B. A. Boley, "The Embedding Technique in Melting and Solidification Problems," *Moving Boundary Problems in Heat Flow and Diffusion*, pp. 150–172, 1974.



- [87] A. T. Patera, "A finite-element/Green's function embedding technique applied to one-dimensional change-of-phase heat transfer," *Numerical Heat Transfer Part A-Applications*, vol. 7, no. 2, pp. 241–247, 1984.
- [88] Y. K. Chuang and J. Szekely, "On the use of Green's functions for solving melting or solidification problems," *International Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 14, no. 9, pp. 1285–1294, 1971.
- [89] J. Clarke, *Energy simulation in building design*. Butterworth Heinemann, 2001.
- [90] J.-Y. Lin and H.-T. Chen, "Hybrid numerical scheme for nonlinear two-dimensional phase-change problems with the irregular geometry," *Heat And Mass Transfer*, vol. 33, no. 1-2, pp. 51–58, 1997.
- [91] T. Cheng, "A numerical simulation for two-dimensional moving boundary problems with a mushy zone," *Computational Mechanics*, vol. 23, no. 5-6, pp. 440–447, 1999.
- [92] T. Cheng, "Numerical analysis of nonlinear multiphase Stefan problems," *Computers & Structures*, vol. 75, no. 2, pp. 225–233, 2000.
- [93] D. Stephenson and G. Mitalas, "Calculation of heat conduction transfer functions for multi-layer slabs," *ASHRAE Transactions*, vol. 77, no. 2, pp. 117–126, 1971.
- [94] ASHRAE, *ASHRAE Handbook of fundamentals*. ASHRAE, 1993.
- [95] J. Barbour and D. Hittle, "Modeling Phase Change Materials With Conduction Transfer Functions for Passive Solar Applications," *Journal Of Solar Energy Engineering-Transactions Of The Asme*, vol. 128, no. 1, pp. 58–68, 2006.
- [96] H. Yano, A. Kieda, and K. Nishioka, "A combined scheme of finite elements and finite differences," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 326, no. 1, pp. 131–137, 1989.
- [97] O. C. Zienkiewicz and R. Taylor, *El método de los elementos finitos: Formulación básica y problemas lineales*. Mc Graw Hill, 1994.
- [98] O. C. Zienkiewicz, "Finite Element Methods in Thermal Problems," pp. 1–25, *Numerical Methods in Heat Transfer*, 1981.
- [99] N. Zabaras and S. Mukherjee, "An analysis of solidification problems by the boundary element method," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 24, no. 10, pp. 1879–1900, 1987.
- [100] G. Comini, S. del Giudice, R. Lewis, and O. C. Zienkiewicz, "Finite Element Solution of Non-linear Heat Conduction Problems with Special Reference to Phase Change," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 613–624, 1974.

- [101] S. Del Giudice, G. Comini, and R. W. Lewis, "Finite element simulation of freezing processes in soils," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 2, no. 3, pp. 223–235, 1978.
- [102] B. G. Thomas, I. V. Samarasekera, and J. K. Brimacombe, "Comparison of numerical modeling techniques for complex, two-dimensional, transient heat-conduction problems," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 15, no. 2, pp. 307–318, 1984.
- [103] R. W. Lewis and P. M. Roberts, "Finite element simulation of solidification problems," *Applied Scientific Research*, vol. 44, no. 1-2, pp. 61–92, 1987.
- [104] K. Ho and R. Pehlke, "Comparison of finite element and general finite difference methods for transient heat flow," *Materials Science and Technology*, vol. 3, no. 6, pp. 466–476, 1987.
- [105] G. E. Schneider and M. J. Raw, "An Implicit Solution Procedure for Finite Difference Modeling of the Stefan Problem," *AIAA Journal*, vol. 22, no. 11, pp. 1685–1690, 1984.
- [106] M. J. Raw and G. E. Schneider, "A new implicit solution procedure for multidimensional finite-difference modeling of the Stefan problem," *Numerical Heat Transfer*, vol. 8, pp. 559–571, 1985.
- [107] S. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*. Taylor & Francis, 1980.
- [108] K. Mastanaiah, "On the numerical solution of phase change problems in transient nonlinear heat conduction," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 833–844, 1976.
- [109] K. O'Neill, "Boundary integral equation solution of moving boundary phase change problems," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 19, no. 12, pp. 1825–1850, 1983.
- [110] S. C. Gupta, "A moving grid numerical scheme for multi-dimensional solidification with transition temperature range," *Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering*, vol. 189, no. 2, pp. 525–544, 2000.
- [111] A. J. Dalhuijsen and A. Segal, "Comparison of finite element techniques for solidification problems," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 23, no. 10, pp. 1807–1829, 1986.
- [112] B. Rubinsky and E. G. Cravahlo, "A finite element method for the solution of one-dimensional phase change problems," *International Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 24, no. 12, pp. 1987–1989, 1981.
- [113] R. Furzeland, "A Comparative Study of Numerical Methods for Moving Boundary Problems," *IMA Journal of Applied Mathematics*, vol. 26, no. 4, pp. 411–429, 1980.



- [114] H. G. Landau, "Heat Conduction in a Melting Solid," *Quart App Math*, vol. 8, no. 1, pp. 81–94, 1950.
- [115] S. D. Gilmore and S. I. Güceri, "Three-Dimensional Solidification, a Numerical Approach," *Numerical Heat Transfer*, vol. 14, pp. 165–186, 1988.
- [116] A. Lazaridis, "A numerical solution of the multidimensional solidification (or melting) problem," *Internartional Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 13, no. 9, pp. 1459–1477, 1970.
- [117] V. R. Voller and M. Cross, "Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method," *Internartional Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 24, no. 3, pp. 545–556, 1981.
- [118] T. Saitoh, "Numerical Method for Multi-Dimensional Freezing Problems in Arbitrary Domains," *Journal Of Heat Transfer-Transactions Of The Asme*, vol. 100, pp. 294–299, 1978.
- [119] T. Saitoh and K. Hirose, "Numerical method for the two-dimensional freezing problem around a horizontal cylinder encompassing a density inversion point," *Bulletin of the JS-ME*, vol. 24, no. 187, pp. 147–152, 1981.
- [120] V. R. Voller and M. Cross, "An explicit numerical method to track a moving phase change front," *Internartional Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 26, no. 1, pp. 147–150, 1983.
- [121] V. R. Voller, "Interpretation of the enthalpy in a discretised multidimensional region undergoing a melting/freezing phase change," *International Communications In Heat And Mass Transfer*, vol. 10, no. 4, pp. 323–328, 1983.
- [122] H. G. Askar, "The front-tracking scheme for the one-dimensional freezing problem," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 24, no. 5, pp. 859–869, 1987.
- [123] L. A. Crivelli and S. R. Idelsohn, "A temperature-based finite element solution for phase-change problems," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 99–119, 1986.
- [124] N. Shamsundar and E. Sparrow, "Analysis of multi-dimensional conduction phase change via the enthalpy model," *Journal Of Heat Transfer-Transactions Of The Asme*, vol. 97, pp. 333–340, 1975.
- [125] F. Civan and C. M. Sliepcevich, "Efficient numerical solution for enthalpy formulation of conduction heat transfer with phase change," *Internartional Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 27, no. 8, pp. 1428–1430, 1984.

- [126] S. S. M. Tehrani, R. A. Taylor, P. Saberi, and G. Diarce, "Design and feasibility of high temperature shell and tube latent heat thermal energy storage system for solar thermal power plants," *Renewable Energy*, vol. 96, pp. 120–136, 2016.
- [127] C. Bonacina and G. Comini, "On the solution of the nonlinear heat conduction equations by numerical methods," *International Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 16, no. 3, pp. 581–589, 1973.
- [128] C. Bonacina, G. Comini, A. Fasano, and M. Primicerio, "On the estimation of thermophysical properties in nonlinear heat-conduction problems," *International Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 17, no. 8, pp. 861–867, 1974.
- [129] E. C. Lemmon, "Multidimensional integral phase change approximations for finite element conduction codes," pp. 201–213, *Numerical Methods in Heat Transfer*, 1981.
- [130] K. Morgan, R. W. LEWIS, and O. C. Zienkiewicz, "Improved Algorithm for Heat-Conduction Problems with Phase-Change," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 12, no. 7, pp. 1191–1195, 1978.
- [131] N. Zabararas, "Inverse finite element techniques for the analysis of solidification processes," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 29, no. 7, pp. 1569–1587, 1990.
- [132] M. Yao and A. Chait, "AN ALTERNATIVE FORMULATION OF THE APPARENT HEAT CAPACITY METHOD FOR PHASE-CHANGE PROBLEMS," *Numerical Heat Transfer Part B-Fundamentals*, vol. 24, no. 3, pp. 279–300, 1993.
- [133] J. S. Hsiao, "An efficient algorithm for Finite-Difference analyses of Heat Transfer with Melting and Solidification," *Numerical Heat Transfer Part A-Applications*, vol. 8, no. 6, pp. 653–666, 1985.
- [134] H. Budhia and F. Kreith, "Heat transfer with melting or freezing in a wedge," *International Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 16, pp. 195–211, 1973.
- [135] H. Li, C. Hsieh, and D. Goswami, "Source and Sink Method of Solution of Two-Dimensional Phase Change for Energy Storage," *Journal Of Solar Energy Engineering-Transactions Of The Asme*, vol. 116, no. 2, pp. 100–106, 1984.
- [136] H. Li, C. Hsieh, and D. Goswami, "Conjugate heat transfer analysis of fluid flow in a phase-change energy storage unit," *International Journal Of Numerical Methods For Heat & Fluid Flow*, vol. 6, no. 3, pp. 77–90, 1996.
- [137] V. R. Voller and C. R. Swaminathan, "General Source-Based Method for Solidification Phase Change," *Numerical Heat Transfer Part B-Fundamentals*, vol. 19, no. 2, pp. 175–189, 1991.



- [138] M. N. Ozisik, "NOTE ON GENERAL FORMULATION OF PHASE-CHANGE PROBLEM AS HEAT-CONDUCTION PROBLEM WITH A MOVING HEAT SOURCE," *Journal Of Heat Transfer-Transactions Of The Asme*, vol. 100, no. 2, pp. 370–371, 1978.
- [139] C. Chang-Yong and C. Hsieh, "Solution of Stefan problems imposed with cyclic temperature and flux boundary conditions," *Internartional Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 35, no. 5, pp. 1181–1195, 1992.
- [140] W. D. Rolph III and K.-J. Bathe, "An efficient algorithm for analysis of nonlinear heat transfer with phase changes," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 119–134, 1982.
- [141] J. Roose and O. Storrer, "Modelization of phase changes by fictitious-heat flow," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 217–225, 1984.
- [142] V. K. Saul'yev, *Integration of equations of parabolic type by method of nets*, vol. 54. Pergamon Press Ltd, 1964.
- [143] F. Kreith and M. Bohn, *Principles of heat transfer*. 1986.
- [144] R. Karvinen, "Numerical Treatment of Axisymmetrical Conduction Phase-Change," *Acta Polytechnica Scandinavica - Mechanical Engineering Series*, vol. 75, pp. 6–16, 1978.
- [145] C. P. Hong, T. Umeda, and Y. Kimura, "Numerical models for casting solidification: Part I. The coupling of the boundary element and finite difference methods for solidification problems," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 15, no. 1, pp. 91–99, 1984.
- [146] A. F. Regin, S. C. Solanki, and J. S. Saini, "An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM capsules: Numerical investigation," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 7, pp. 1765–1773, 2009.
- [147] V. R. Voller, "Implicit Finite-difference Solutions of the Enthalpy Formulation of Stefan Problems," *IMA Journal of Numerical Analysis*, vol. 5, no. 2, pp. 201–214, 1985.
- [148] S. Asgarpour and Y. Bayazitoglu, "Heat Transfer in Laminar Flow With a Phase Change Boundary," *Journal Of Heat Transfer-Transactions Of The Asme*, vol. 104, pp. 678–682, 1982.
- [149] N. R. Vyshak and G. Jilani, "Numerical analysis of latent heat thermal energy storage system," *Energy Conversion And Management*, vol. 48, no. 7, pp. 2161–2168, 2007.
- [150] M. Lees, "A linear three-level difference scheme for quasilinear parabolic equation," *Mathematics of Computation*, vol. 20, p. 516, 1966.
- [151] Q. T. Pham, "A fast, unconditionally stable finite-difference scheme for heat conduction with phase change," *Internartional Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 28, no. 11, pp. 2079–2084, 1985.

- [152] Q. T. Pham, "A note on some finite-difference methods for heat conduction with phase change," *Numerical Heat Transfer Part A-Applications*, vol. 11, no. 3, pp. 353–359, 1987.
- [153] Q. T. Pham, "The use of lumped capacitance in the finite-element solution of heat conduction problems with phase change," *International Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 29, no. 2, pp. 285–291, 1986.
- [154] G. Comini, S. Del Giudice, and O. Saro, "A conservative algorithm for multidimensional conduction phase change," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 30, no. 4, pp. 697–709, 1990.
- [155] M. Hogge, "A comparison of two- and three-level integration schemes for non-linear heat conduction," pp. 75–90, *Numerical Methods in Heat Transfer*, 1981.
- [156] P. Majumdar and A. Saidbakhsh, "A heat transfer model for phase change thermal energy storage," *Heat Recovery Systems and CHP*, vol. 10, no. 5-6, pp. 457–468, 1990.
- [157] A. S. Wood, S. I. M. Ritchie, and G. E. Bell, "An efficient implementation of the enthalpy method," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 301–305, 1981.
- [158] A. S. Wood, "An efficient finite-difference scheme for multidimensional Stefan problems," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 23, no. 9, pp. 1757–1771, 1986.
- [159] G. H. Meyer, "Multidimensional Stefan Problems," *SIAM Journal on Numerical Analysis*, vol. 10, no. 3, pp. 522–538, 1973.
- [160] R. E. White, "An Enthalpy Formulation of the Stefan Problem," *SIAM Journal on Numerical Analysis*, vol. 19, no. 6, pp. 1129–1157, 1982.
- [161] V. R. Voller, "An implicit enthalpy solution for phase change problems: with application to a binary alloy solidification," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 11, no. 2, pp. 110–116, 1987.
- [162] D. Longworth, "A Numerical Method to Determine the Temperature Distribution around a Moving Weld Pool," *Moving Boundary Problems in Heat Flow and Diffusion*, 1975.
- [163] M. Geradin, S. R. Idelsohn, and M. Hogge, "Computational strategies for the solution of large nonlinear problems via quasi-newton methods," *Computers & Structures*, vol. 13, no. 1-3, pp. 73–81, 1981.
- [164] A. Soria and P. Pegon, "Quasi-Newton iterative strategies applied to the heat diffusion equation," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 30, no. 4, pp. 661–677, 1990.



- [165] Y. Varol, A. Koca, H. F. Oztop, and E. Avci, "Forecasting of thermal energy storage performance of Phase Change Material in a solar collector using soft computing techniques," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 4, pp. 2724–2732, 2009.
- [166] I. Kovacecic, A. Poredos, and B. Šarler, "Solving the Stefan Problem with the Radial Basis Function Collocation Method," *Numerical Heat Transfer, Part B*, vol. 44, pp. 575–599, 2003.
- [167] R. Vertnik and B. Šarler, "Meshless local radial basis function collocation method for convective-diffusive solid-liquid phase change problems," *International Journal Of Numerical Methods For Heat & Fluid Flow*, vol. 16, no. 5, pp. 617–640, 2006.
- [168] J. Kanesan, P. Arunasalam, K. N. N. Seetharamu, and I. A. Azid, "Artificial neural network trained, genetic algorithms optimized thermal energy storage heatsinks for electronics cooling," in *IPACK2005, ASME InterPACK'05*, pp. 1389–1395, 2005.
- [169] A. Najafian and A. Moreau, "Integration of PCM in domestic hot water tanks: Optimization for shifting peak demand," *Energy and Buildings*, vol. 106, pp. 59–64, 2015.
- [170] S. A. Kalogirou, "Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 5, no. 4, pp. 373–401, 2001.
- [171] S. A. Kalogirou, "Applications of artificial neural networks in energy systems," *Energy Conversion And Management*, vol. 40, no. 10, pp. 1073–1087, 1999.
- [172] J. F. Kreider, D. E. Claridge, P. Curtiss, R. Dodier, J. S. Haberl, and M. Krarti, "Building Energy Use Prediction and System Identification Using Recurrent Neural Networks," *Journal Of Solar Energy Engineering-Transactions Of The Asme*, vol. 117, no. 3, p. 161, 1995.
- [173] B. Šarler and R. Vertnik, "Meshfree explicit local radial basis function collocation method for diffusion problems," *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 51, no. 8, pp. 1269–1282, 2006.
- [174] S. Deng and Y. Hwang, "Applying neural networks to the solution of forward and inverse heat conduction problems," *International Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 49, no. 25-26, pp. 4732–4750, 2006.
- [175] S. A. Kalogirou, S. Panteliou, and A. Dentsoras, "Artificial neural networks used for the performance prediction of a thermosiphon solar water heater," *Renewable Energy*, vol. 18, no. 1, pp. 87–99, 1999.
- [176] Y. M. Chen and Z. K. Chen, "A neural-network-based experimental technique for determining z-transfer function coefficients of a building envelope," *Building And Environment*, vol. 35, no. 3, pp. 181–189, 2000.

- [177] M. Lundin, "Development and validation of a method aimed at estimating building performance parameters," *Energy and Buildings*, vol. 36, no. 9, pp. 905–914, 2004.
- [178] M. Lundin, S. Andersson, and R. Ostin, "Further validation of a method aimed to estimate building performance parameters," *Energy and Buildings*, 2005.
- [179] S. Guanghai, K. Morita, K. Fukuda, M. Pidduck, J. Dounan, and J. Miettinen, "Analysis of the critical heat flux in round vertical tubes under low pressure and flow oscillation conditions. Applications of artificial neural network," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 220, no. 1, pp. 17–35, 2003.
- [180] S. A. Kalogirou, "Prediction of flat-plate collector performance parameters using artificial neural networks," *Solar Energy*, vol. 80, no. 3, pp. 248–259, 2006.
- [181] K. Ermis, A. Ere, and I. Dincer, "Heat transfer analysis of phase change process in a finned-tube thermal energy storage system using artificial neural network," *International Journal of Heat And Mass Transfer*, vol. 50, no. 15-16, pp. 3163–3175, 2007.
- [182] M. T. Hagan, H. B. Demuth, and M. Beale, *Neural network design*. PWS Publishing Company, 1996.
- [183] C. Castellon, M. Medrano, J. Roca, L. F. Cabeza, M. E. Navarro, A. I. Fernandez, A. Lazaro, and B. Zalba, "Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels," *Renewable Energy*, 2010.
- [184] V. V. Tyagi, S. C. Kaushik, S. K. Tyagi, and T. Akiyama, "Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010.
- [185] A. Khudhair, M. Farid, N. Ozkan, and J. Chen, "Thermal performance and mechanical testing of gypsum wallboard with latent heat storage," in *IEA Annex 17 Workshop*, 2003.
- [186] G. Zhou, Y. Yang, and H. Xu, "Performance of shape-stabilized phase change material wallboard with periodical outside heat flux waves," *Applied Energy*, vol. 88, no. 6, pp. 2113–2121, 2011.
- [187] K. A. R. Ismail and J. Castro, "PCM thermal insulation in buildings," *International Journal Of Energy Research*, vol. 21, no. 14, pp. 1281–1296, 1997.
- [188] M. Ibañez, A. Lazaro, B. Zalba, and L. F. Cabeza, "An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS," *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, no. 11-12, pp. 1796–1807, 2005.
- [189] L. F. Cabeza, C. Castellon, M. Nogues, M. Medrano, R. Leppers, and O. Zubillaga, "Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings," *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 2, pp. 113–119, 2007.



- [190] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, and L. F. Cabeza, “Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling,” *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 4, pp. 534–540, 2009.
- [191] A. de Gracia, L. Rincón, A. Castell, M. Jiménez, D. Boer, M. Medrano, and L. F. Cabeza, “Life cycle assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in experimental buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 9, pp. 1517–1523, 2010.
- [192] X. Mi, R. Liu, H. Cui, S. A. Memon, F. Xing, and Y. Lo, “Energy and economic analysis of building integrated with PCM in different cities of China,” *Applied Energy*, vol. 175, pp. 324–336, 2016.
- [193] H.-M. Chou, C.-R. Chen, and V.-L. Nguyen, “A new design of metal-sheet cool roof using PCM,” *Energy and Buildings*, vol. 57, pp. 42–50, 2013.
- [194] E. M. Alawadhi and H. J. Alqallaf, “Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study,” *Energy Conversion And Management*, vol. 52, no. 8-9, pp. 2958–2964, 2011.
- [195] H. Weinlaeder, A. Beck, and J. Fricke, “PCM-facade-panel for daylighting and room heating,” *Solar Energy*, vol. 78, no. 2, pp. 177–186, 2005.
- [196] A. Urresti, G. Diarce, A. García-Romero, A. Delgado, A. Erkoreka, C. Escudero, and A. Campos Celador, “Ventilated active façades with PCM,” in *Innostock 2012*, 2012.
- [197] A. Joulin, Z. Younsi, L. Zalewski, S. Lassue, D. R. Rousse, and J.-P. Cavrot, “Experimental and numerical investigation of a phase change material: Thermal-energy storage and release,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 7, pp. 2454–2462, 2011.
- [198] P. Schossig, H. Henning, S. Gschwander, and T. Haussmann, “Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials,” *Solar Energy Materials And Solar Cells*, vol. 89, no. 2-3, pp. 297–306, 2005.
- [199] Dupont, “DuPont Energain.”
- [200] A. Urresti, J. M. Sala, A. García-Romero, G. Diarce, and C. Escudero, “Validation of heat transfer models for PCMs with a conductivimeter,” in *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 395–403, Elsevier BV, 2012.
- [201] K. Peippo, P. Kauranen, and P. D. Lund, “A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating,” *Energy and Buildings*, vol. 17, no. 4, pp. 259–270, 1991.
- [202] T. Stovall and J. Tomlinson, “What are the potential benefits of including latent storage in common wallboard?,” *Journal Of Solar Energy Engineering-Transactions Of The Asme*, vol. 117, no. 4, pp. 318–325, 1995.

- [203] D. Neepser, “Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage,” *Solar Energy*, vol. 68, no. 5, pp. 393–403, 2000.
- [204] Ministerio de Industria Energía y Turismo, “Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios,” tech. rep., 2015.
- [205] I. Flores, *El método de análisis exergético en los edificios. Su aplicación en la caracterización en régimen dinámico de los cerramientos*. PhD thesis, UPV/EHU, 2016.
- [206] D. C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*. 2ª edición ed., 2002.



# Apéndice A

## Nomenclatura

A continuación se presenta un listado de la nomenclatura empleada a lo largo de todo el documento.

### Letras Latinas

Símb	Descripción	Unidades
a	Salida de una neurona	
	CTF que relaciona el flujo de calor temperatura y flujo exterior	W/m <sup>2</sup> K
A	Área	m <sup>2</sup>
b	Bias de las redes neuronales	
	CTF que relaciona la temperatura y flujo en lados contrarios	W/m <sup>2</sup> K
c	Calor específico	kJ/kg·K
	CTF que relaciona el flujo de calor temperatura y flujo interior	W/m <sup>2</sup> K
$c_{eff}$	Calor efectivo	kJ/kg·K
<b>e</b>	Vector de errores	
E	Energía	kJ ó J
F	Factor de forma	
d	CTF que relaciona flujo actual con flujos anteriores	
h	Entalpía específica	kJ/kg ó J/kg
	Coefficiente de transmisión de calor superficial	W/m <sup>2</sup> K
<b>I</b>	Matriz identidad	
	Irradiancia	W/m <sup>2</sup> K
k	Conductividad	W/m·K
n	Vector de posición	m
N	Funciones de forma de elementos finitos	
<b>N</b>	Matriz de funciones de forma	
t	Tiempo	s
T	Temperatura	°C ó K



Símb	Descripción	Unidades
w	Pesos de las redes neuronales	
p	Entrada a una neurona	
q	Flujo de calor	W/m <sup>2</sup>
R	Número de variables de entrada a la red neuronal	
S	Número de neuronas de una capa	
V	Volumen	m <sup>3</sup>
W	Funciones de peso de elementos finitos	
x	Distancia	m
X	Posición de la interfase	m

#### Subíndices y Superíndices

c, conv	Convección
ext	Exterior
f	Fusión
int	Interior
ir	Infrarrojo
l	Líquido
r	Radiación
s	Sólido
w	Superficial
+	Derecha
	Posterior
-	Izquierda
	Anterior
*	Estado saturado

En ecuaciones en diferencias el subíndice hace referencia a la posición nodal y el superíndice al instante de tiempo

#### Letras Griegas y símbolos

$\alpha$	Difusividad	m <sup>2</sup> /s
	Absortividad	
$\beta$	Parámetro de la ecuación de Neuman	
$\gamma$	Parámetro de discretización temporal	
$\Gamma$	Superficie o contorno	
$\theta$	Temperatura adimensional	
$\lambda$	Calor Latente	kJ/kg
$\rho$	Densidad	kg/m <sup>3</sup>

Símb	Descripción	Unidades
$\phi$	Entalpía adimensional	
$\Omega$	Cuerpo o volumen	
<u>Números Adimensionales</u>		
Ste	Número de Stefan	



## Apéndice B

# Datos del diseño de experimentos

### B.1. Codificación de variables

Como se ha comentado en el capítulo 11, es habitual diseñar y tratar el experimento con variables codificadas entre -1 y 1, para usar la misma escala en todas ellas, de manera que se más sencillo identificar la importancia de los efectos de cada una de ellas. En este caso, las codificaciones van a ser las mismas para todas las variables de ambos lotes, excepto para la temperatura media de cambio de fase. Las codificaciones se presentan a continuación.

Diferencia de temperatura de cambio de fase:

$$A = \Delta T - 5.05 \quad (\text{B.1})$$

Temperatura media de cambio de fase en el lote 1:

$$B = \frac{T_m - 35}{4} \quad (\text{B.2})$$

Temperatura media de cambio de fase en el lote 2:

$$B = \frac{T_m - 21}{4} \quad (\text{B.3})$$

Temperatura media de cambio de fase en el lote 3:

$$B = \frac{T_m - 31}{4} \quad (\text{B.4})$$

Calor latente de cambio de fase en los lotes 1 y 2:

$$C = \frac{\lambda - 200000}{50000} \quad (\text{B.5})$$

Calor latente de cambio de fase en el lote 3:

$$C = \frac{\lambda - 210000}{50000} \quad (\text{B.6})$$



Espesor de la capa de PCM en los lotes 1 y 2:

$$D = \frac{L - 0.02}{0.005} \quad (\text{B.7})$$

Espesor de la capa de PCM en el lote 3:

$$D = \frac{L - 0.03}{0.005} \quad (\text{B.8})$$

Densidad de la capa de PCM en los lotes 1 y 2:

$$E = \frac{\rho - 1350}{300} \quad (\text{B.9})$$

Densidad de la capa de PCM en el lote 3:

$$E = \frac{\rho - 1600}{300} \quad (\text{B.10})$$

Calor específico de la capa de PCM en los lotes 1 y 2:

$$F = \frac{c_p - 1550}{500} \quad (\text{B.11})$$

Calor específico de la capa de PCM en el lote 3:

$$F = \frac{c_p - 2000}{500} \quad (\text{B.12})$$

Conductividad con el PCM en estado sólido:

$$G = \frac{k_{sol} - 0.3}{0.1} \quad (\text{B.13})$$

Conductividad con el PCM en estado líquido:

$$H = \frac{k_{liq} - 0.35}{0.1} \quad (\text{B.14})$$

Los valores de la codificación se han elegido para que el valor medio de las propiedades quede cercano al 0 como valor codificado, y al mismo tiempo que ninguna de las propiedades tome valores no admisibles, como valores negativos para alguna de ellas, o valores excesivamente grandes, fuera del rango habitual de variación de las mismas.

## B.2. Diseño codificado

En la tabla B.1 se representa el diseño de experimento utilizado con los datos codificados. Para las corridas axiales del diseño central compuesto, se ha usado el valor de 2.828427, que

lo convierte en un diseño rotatable y ortogonal<sup>1</sup>. Este valor no se ha mantenido para la variable D, que corresponde con el espesor, que se ha aumentado hasta el valor entero más próximo, 3. Esto es debido a que el valor del espesor está cuantificado en el algoritmo de cálculo, que usa 0.005 m como distancia entre nodos.

### **B.3. Diseños de los lotes en variables reales**

Con los datos del diseño codificado, se descodifican para cada uno de los lotes para obtener los valores reales de las propiedades sobre las que simular el comportamiento del muro compuesto. Se han obtenido así las tablas B.2, B.3 y B.4 que recogen los valores de las propiedades para los lotes 1, 2 y 3 respectivamente.

### **B.4. Resultados de las simulaciones**

Con los datos facilitados en las tablas B.2 y B.3, se ha procedido a realizar las simulaciones de los muros definidos, así como los muros sin PCM que están agrupados en el lote 0. En las tablas B.5, B.6, y B.7, se representan respectivamente los resultados de las simulaciones para cada uno de los parámetros de análisis definidos en el capítulo 11. Se mantiene el mismo código de ensayo que en las tablas de propiedades, y para el lote 0, el mismo orden definido capítulo, siendo el valor inicial para el muro sin aislamiento, y los siguientes con el aislamiento por el exterior, en la cámara de aire, y por el interior respectivamente.

<sup>1</sup>En la tabla sólo aparecen los dos primeros decimales, por motivos de espacio en la representación



ID	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00
2	-1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00
3	-1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00
4	-1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00
5	1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00
6	1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00
7	1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
8	1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00
9	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
10	1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00
11	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00
12	-1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00
13	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00
14	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00
17	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00
18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00
20	-1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00
21	1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00
22	1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00
23	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00
24	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00
25	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00
26	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
27	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00
28	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00
29	1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
30	1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00
31	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00
32	-1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00
33	-1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00
34	1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00
35	1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00
36	1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00
37	-1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00
38	1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00
39	-1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00
40	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00
41	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
42	1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00
43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
44	1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00
45	1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00
46	-1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
47	-1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00
48	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00
49	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00
50	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00
51	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00
52	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00
53	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00
54	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00
55	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
56	1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00
57	1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00
58	-1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00
59	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00
60	1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00
61	-1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00
62	1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00
63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
64	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
65	1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00
66	-1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00
67	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00
68	1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00
69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.83	0.00	0.00
70	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.83	0.00	0.00	0.00
71	0.00	0.00	0.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
72	0.00	0.00	-2.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
73	0.00	0.00	0.00	-3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.83	0.00
75	-2.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.83
77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.83	0.00	0.00
78	0.00	2.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
79	0.00	0.00	2.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.83	0.00
81	2.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.83
83	0.00	0.00	0.00	0.00	2.83	0.00	0.00	0.00
84	0.00	-2.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla B.1: Diseño de Experimento codificado

ID	$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (J/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)	$k_{liq}$ (W/m·K)
1	6.05	39.00	250000	0.025	1050	1050	0.400	0.450
2	4.05	31.00	250000	0.025	1050	2050	0.400	0.250
3	4.05	39.00	250000	0.025	1050	2050	0.200	0.450
4	4.05	39.00	250000	0.015	1650	2050	0.400	0.250
5	6.05	39.00	150000	0.025	1650	2050	0.200	0.450
6	6.05	39.00	250000	0.015	1650	1050	0.200	0.250
7	6.05	31.00	250000	0.025	1050	1050	0.200	0.250
8	6.05	39.00	150000	0.015	1050	2050	0.400	0.250
9	4.05	39.00	150000	0.015	1050	1050	0.200	0.250
10	6.05	31.00	150000	0.025	1650	2050	0.400	0.250
11	4.05	31.00	250000	0.015	1650	2050	0.200	0.450
12	4.05	39.00	150000	0.025	1650	1050	0.400	0.450
13	6.05	31.00	150000	0.015	1050	2050	0.200	0.450
14	6.05	31.00	250000	0.015	1650	1050	0.400	0.450
15	5.05	35.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
16	4.05	31.00	150000	0.025	1650	1050	0.200	0.250
17	4.05	31.00	150000	0.015	1050	1050	0.400	0.450
18	5.05	35.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
19	6.05	31.00	250000	0.015	1050	1050	0.400	0.250
20	4.05	39.00	250000	0.025	1650	2050	0.200	0.250
21	6.05	39.00	250000	0.015	1050	1050	0.200	0.450
22	6.05	31.00	150000	0.025	1050	2050	0.400	0.450
23	6.05	39.00	250000	0.025	1650	1050	0.400	0.250
24	6.05	31.00	150000	0.015	1650	2050	0.200	0.250
25	4.05	39.00	150000	0.015	1650	1050	0.200	0.450
26	4.05	31.00	250000	0.025	1650	2050	0.400	0.450
27	4.05	31.00	250000	0.015	1050	2050	0.200	0.250
28	4.05	31.00	150000	0.015	1650	1050	0.400	0.250
29	6.05	39.00	150000	0.015	1650	2050	0.400	0.450
30	6.05	39.00	150000	0.025	1050	2050	0.200	0.250
31	4.05	31.00	150000	0.025	1050	1050	0.200	0.450
32	4.05	39.00	250000	0.015	1050	2050	0.400	0.450
33	4.05	39.00	150000	0.025	1050	1050	0.400	0.250
34	6.05	31.00	250000	0.025	1650	1050	0.200	0.450
35	6.05	39.00	250000	0.025	1050	2050	0.400	0.250
36	6.05	31.00	150000	0.025	1650	1050	0.400	0.450
37	4.05	39.00	250000	0.015	1650	1050	0.400	0.450
38	6.05	39.00	250000	0.015	1650	2050	0.200	0.450
39	4.05	31.00	250000	0.025	1050	1050	0.400	0.450
40	6.05	31.00	250000	0.015	1650	2050	0.400	0.250
41	6.05	31.00	150000	0.015	1050	1050	0.200	0.250
42	6.05	39.00	150000	0.025	1650	1050	0.200	0.250
43	5.05	35.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
44	6.05	31.00	250000	0.025	1050	2050	0.200	0.450
45	6.05	39.00	150000	0.015	1050	1050	0.400	0.450
46	4.05	39.00	250000	0.025	1050	1050	0.200	0.250
47	4.05	39.00	150000	0.025	1650	2050	0.400	0.250
48	4.05	31.00	250000	0.015	1650	1050	0.200	0.250
49	4.05	31.00	150000	0.025	1650	2050	0.200	0.450
50	4.05	31.00	150000	0.015	1050	2050	0.400	0.250
51	4.05	39.00	150000	0.015	1050	2050	0.200	0.450
52	4.05	31.00	150000	0.025	1050	2050	0.200	0.250
53	6.05	31.00	150000	0.015	1650	1050	0.200	0.450
54	4.05	31.00	250000	0.025	1650	1050	0.400	0.250
55	4.05	31.00	150000	0.015	1650	2050	0.400	0.450
56	6.05	31.00	150000	0.025	1050	1050	0.400	0.250
57	6.05	39.00	150000	0.015	1650	1050	0.400	0.250
58	4.05	39.00	250000	0.015	1050	1050	0.400	0.250
59	4.05	39.00	150000	0.015	1650	2050	0.200	0.250
60	6.05	39.00	150000	0.025	1050	1050	0.200	0.450
61	4.05	39.00	250000	0.025	1650	1050	0.200	0.450
62	6.05	39.00	250000	0.015	1050	2050	0.200	0.250
63	5.05	35.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
64	6.05	39.00	250000	0.025	1650	2050	0.400	0.450
65	6.05	31.00	250000	0.025	1650	2050	0.200	0.250
66	4.05	39.00	150000	0.025	1050	2050	0.400	0.450
67	4.05	31.00	250000	0.015	1050	1050	0.200	0.450
68	6.05	31.00	250000	0.015	1050	2050	0.400	0.450
69	5.05	35.00	200000	0.020	1350	2964	0.300	0.350
70	5.05	35.00	200000	0.020	501	1550	0.300	0.350
71	5.05	35.00	200000	0.035	1350	1550	0.300	0.350
72	5.05	35.00	58579	0.020	1350	1550	0.300	0.350
73	5.05	35.00	200000	0.005	1350	1550	0.300	0.350
74	5.05	35.00	200000	0.020	1350	1550	0.583	0.350
75	2.22	35.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
76	5.05	35.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.067
77	5.05	35.00	200000	0.020	1350	136	0.300	0.350
78	5.05	46.31	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
79	5.05	35.00	341421	0.020	1350	1550	0.300	0.350
80	5.05	35.00	200000	0.020	1350	1550	0.017	0.350
81	7.88	35.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
82	5.05	35.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.633
83	5.05	35.00	200000	0.020	2199	1550	0.300	0.350
84	5.05	23.69	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
85	5.05	35.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350

Tabla B.2: Propiedades de simulación para el Lote 1



ID	$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (J/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)	$k_{liq}$ (W/m·K)
1	6.05	25.00	250000	0.025	1050	1050	0.400	0.450
2	6.05	17.00	250000	0.025	1050	1050	0.200	0.250
3	5.05	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
4	4.05	17.00	150000	0.025	1650	1050	0.200	0.250
5	4.05	17.00	250000	0.025	1050	2050	0.400	0.250
6	4.05	17.00	250000	0.015	1650	2050	0.200	0.450
7	4.05	25.00	250000	0.025	1050	2050	0.200	0.450
8	6.05	17.00	150000	0.025	1650	2050	0.400	0.250
9	6.05	25.00	150000	0.025	1650	2050	0.200	0.450
10	6.05	25.00	250000	0.015	1650	1050	0.200	0.250
11	6.05	17.00	250000	0.015	1650	1050	0.400	0.450
12	4.05	25.00	150000	0.025	1650	1050	0.400	0.450
13	4.05	25.00	250000	0.015	1650	2050	0.400	0.250
14	6.05	17.00	150000	0.015	1050	2050	0.200	0.450
15	4.05	25.00	150000	0.015	1050	1050	0.200	0.250
16	4.05	17.00	150000	0.015	1050	1050	0.400	0.450
17	6.05	25.00	150000	0.015	1050	2050	0.400	0.250
18	6.05	25.00	250000	0.025	1650	1050	0.400	0.250
19	6.05	25.00	150000	0.015	1650	2050	0.400	0.450
20	6.05	17.00	150000	0.025	1050	2050	0.400	0.450
21	6.05	17.00	150000	0.015	1650	2050	0.200	0.250
22	6.05	17.00	250000	0.015	1050	1050	0.400	0.250
23	6.05	25.00	150000	0.025	1050	2050	0.200	0.250
24	4.05	25.00	250000	0.025	1650	2050	0.200	0.250
25	6.05	25.00	250000	0.015	1050	1050	0.200	0.450
26	4.05	25.00	150000	0.025	1050	1050	0.400	0.250
27	4.05	17.00	250000	0.015	1050	2050	0.200	0.250
28	4.05	25.00	250000	0.015	1050	2050	0.400	0.450
29	5.05	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
30	6.05	17.00	250000	0.025	1650	1050	0.200	0.450
31	4.05	17.00	250000	0.025	1650	2050	0.400	0.450
32	4.05	17.00	150000	0.025	1050	1050	0.200	0.450
33	4.05	17.00	150000	0.015	1650	1050	0.400	0.250
34	4.05	25.00	150000	0.015	1650	1050	0.200	0.450
35	4.05	17.00	150000	0.025	1650	2050	0.200	0.450
36	6.05	17.00	250000	0.015	1650	2050	0.400	0.250
37	6.05	17.00	150000	0.015	1050	1050	0.200	0.250
38	5.05	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
39	4.05	17.00	250000	0.025	1050	1050	0.400	0.450
40	6.05	17.00	250000	0.025	1050	2050	0.200	0.450
41	6.05	25.00	250000	0.025	1050	2050	0.400	0.250
42	4.05	17.00	150000	0.015	1050	2050	0.400	0.250
43	4.05	25.00	250000	0.015	1650	1050	0.400	0.450
44	6.05	17.00	150000	0.025	1650	1050	0.400	0.450
45	4.05	25.00	250000	0.025	1050	1050	0.200	0.250
46	6.05	25.00	150000	0.015	1050	1050	0.400	0.450
47	4.05	25.00	150000	0.025	1650	2050	0.400	0.250
48	4.05	17.00	250000	0.015	1650	1050	0.200	0.250
49	6.05	25.00	250000	0.015	1650	2050	0.200	0.450
50	6.05	25.00	150000	0.025	1650	1050	0.200	0.250
51	4.05	25.00	150000	0.015	1050	2050	0.200	0.450
52	4.05	17.00	150000	0.025	1050	2050	0.200	0.250
53	4.05	17.00	150000	0.015	1650	2050	0.400	0.450
54	6.05	25.00	250000	0.015	1050	2050	0.200	0.250
55	6.05	17.00	250000	0.015	1050	2050	0.400	0.450
56	4.05	25.00	250000	0.025	1650	1050	0.200	0.450
57	5.05	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
58	6.05	25.00	250000	0.025	1650	2050	0.400	0.450
59	4.05	17.00	250000	0.015	1050	1050	0.200	0.450
60	6.05	17.00	250000	0.025	1650	2050	0.200	0.250
61	6.05	25.00	150000	0.015	1650	1050	0.400	0.250
62	4.05	25.00	250000	0.015	1050	1050	0.400	0.250
63	4.05	25.00	150000	0.025	1050	2050	0.400	0.450
64	4.05	17.00	250000	0.025	1650	1050	0.400	0.250
65	6.05	25.00	150000	0.025	1050	1050	0.200	0.450
66	6.05	17.00	150000	0.025	1050	1050	0.400	0.250
67	4.05	25.00	150000	0.015	1650	2050	0.200	0.250
68	6.05	17.00	150000	0.015	1650	1050	0.200	0.450
69	5.05	21.00	200000	0.020	1350	2964	0.300	0.350
70	5.05	21.00	200000	0.020	501	1550	0.300	0.350
71	5.05	21.00	200000	0.005	1350	1550	0.300	0.350
72	5.05	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.633
73	5.05	32.31	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
74	5.05	21.00	200000	0.020	2199	1550	0.300	0.350
75	5.05	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.017	0.350
76	5.05	21.00	341421	0.020	1350	1550	0.300	0.350
77	5.05	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.067
78	5.05	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
79	2.22	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
80	5.05	21.00	200000	0.035	1350	1550	0.300	0.350
81	5.05	21.00	200000	0.020	1350	136	0.300	0.350
82	5.05	21.00	58579	0.020	1350	1550	0.300	0.350
83	7.88	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
84	5.05	9.69	200000	0.020	1350	1550	0.300	0.350
85	5.05	21.00	200000	0.020	1350	1550	0.583	0.350

Tabla B.3: Propiedades de simulación para el Lote 2

ID	$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\lambda$ (J/kg)	L (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k_{sol}$ (W/m·K)	$k_{liq}$ (W/m·K)
1	6.05	35.00	260000.00	0.04	1300.00	1500.00	0.40	0.45
2	4.05	27.00	260000.00	0.04	1300.00	2500.00	0.40	0.25
3	4.05	35.00	260000.00	0.04	1300.00	2500.00	0.20	0.45
4	4.05	35.00	260000.00	0.02	1900.00	2500.00	0.40	0.25
5	6.05	35.00	160000.00	0.04	1900.00	2500.00	0.20	0.45
6	6.05	35.00	260000.00	0.02	1900.00	1500.00	0.20	0.25
7	6.05	27.00	260000.00	0.04	1300.00	1500.00	0.20	0.25
8	6.05	35.00	160000.00	0.02	1300.00	2500.00	0.40	0.25
9	4.05	35.00	160000.00	0.02	1300.00	1500.00	0.20	0.25
10	6.05	27.00	160000.00	0.04	1900.00	2500.00	0.40	0.25
11	4.05	27.00	260000.00	0.02	1900.00	2500.00	0.20	0.45
12	4.05	35.00	160000.00	0.04	1900.00	1500.00	0.40	0.45
13	6.05	27.00	160000.00	0.02	1300.00	2500.00	0.20	0.45
14	6.05	27.00	260000.00	0.02	1900.00	1500.00	0.40	0.45
15	5.05	31.00	210000.00	0.03	1600.00	2000.00	0.30	0.35
16	4.05	27.00	160000.00	0.04	1900.00	1500.00	0.20	0.25
17	4.05	27.00	160000.00	0.02	1300.00	1500.00	0.40	0.45
18	5.05	31.00	210000.00	0.03	1600.00	2000.00	0.30	0.35
19	6.05	27.00	260000.00	0.02	1300.00	1500.00	0.40	0.25
20	4.05	35.00	260000.00	0.04	1900.00	2500.00	0.20	0.25
21	6.05	35.00	260000.00	0.02	1300.00	1500.00	0.20	0.45
22	6.05	27.00	160000.00	0.04	1300.00	2500.00	0.40	0.45
23	6.05	35.00	260000.00	0.04	1900.00	1500.00	0.40	0.25
24	6.05	27.00	160000.00	0.02	1900.00	2500.00	0.20	0.25
25	4.05	35.00	160000.00	0.02	1900.00	1500.00	0.20	0.45
26	4.05	27.00	260000.00	0.04	1900.00	2500.00	0.40	0.45
27	4.05	27.00	260000.00	0.02	1300.00	2500.00	0.20	0.25
28	4.05	27.00	160000.00	0.02	1900.00	1500.00	0.40	0.25
29	6.05	35.00	160000.00	0.02	1900.00	2500.00	0.40	0.45
30	6.05	35.00	160000.00	0.04	1300.00	2500.00	0.20	0.25
31	4.05	27.00	160000.00	0.04	1300.00	1500.00	0.20	0.45
32	4.05	35.00	260000.00	0.02	1300.00	2500.00	0.40	0.45
33	4.05	35.00	160000.00	0.04	1300.00	1500.00	0.40	0.25
34	6.05	27.00	260000.00	0.04	1900.00	1500.00	0.20	0.45
35	6.05	35.00	260000.00	0.04	1300.00	2500.00	0.40	0.25
36	6.05	27.00	160000.00	0.04	1900.00	1500.00	0.40	0.45
37	4.05	35.00	260000.00	0.02	1900.00	1500.00	0.40	0.45
38	6.05	35.00	260000.00	0.02	1900.00	2500.00	0.20	0.45
39	4.05	27.00	260000.00	0.04	1300.00	1500.00	0.40	0.45
40	6.05	27.00	260000.00	0.02	1900.00	2500.00	0.40	0.25
41	6.05	27.00	160000.00	0.02	1300.00	1500.00	0.20	0.25
42	6.05	35.00	160000.00	0.04	1900.00	1500.00	0.20	0.25
43	5.05	31.00	210000.00	0.03	1600.00	2000.00	0.30	0.35
44	6.05	27.00	260000.00	0.04	1300.00	2500.00	0.20	0.45
45	6.05	35.00	160000.00	0.02	1300.00	1500.00	0.40	0.45
46	4.05	35.00	260000.00	0.04	1300.00	1500.00	0.20	0.25
47	4.05	35.00	160000.00	0.04	1900.00	2500.00	0.40	0.25
48	4.05	27.00	260000.00	0.02	1900.00	1500.00	0.20	0.25
49	4.05	27.00	160000.00	0.04	1900.00	2500.00	0.20	0.45
50	4.05	27.00	160000.00	0.02	1300.00	2500.00	0.40	0.25
51	4.05	35.00	160000.00	0.02	1300.00	2500.00	0.20	0.45
52	4.05	27.00	160000.00	0.04	1300.00	2500.00	0.20	0.25
53	6.05	27.00	160000.00	0.02	1900.00	1500.00	0.20	0.45
54	4.05	27.00	260000.00	0.04	1900.00	1500.00	0.40	0.25
55	4.05	27.00	160000.00	0.02	1900.00	2500.00	0.40	0.45
56	6.05	27.00	160000.00	0.04	1300.00	1500.00	0.40	0.25
57	6.05	35.00	160000.00	0.02	1900.00	1500.00	0.40	0.25
58	4.05	35.00	260000.00	0.02	1300.00	1500.00	0.40	0.25
59	4.05	35.00	160000.00	0.02	1900.00	2500.00	0.20	0.25
60	6.05	35.00	160000.00	0.04	1300.00	1500.00	0.20	0.45
61	4.05	35.00	260000.00	0.04	1900.00	1500.00	0.20	0.45
62	6.05	35.00	260000.00	0.02	1300.00	2500.00	0.20	0.25
63	5.05	31.00	210000.00	0.03	1600.00	2000.00	0.30	0.35
64	6.05	35.00	260000.00	0.04	1900.00	2500.00	0.40	0.45
65	6.05	27.00	260000.00	0.04	1900.00	2500.00	0.20	0.25
66	4.05	35.00	160000.00	0.04	1300.00	2500.00	0.40	0.45
67	4.05	27.00	260000.00	0.02	1300.00	1500.00	0.20	0.45
68	6.05	27.00	260000.00	0.02	1300.00	2500.00	0.40	0.45
69	5.05	31.00	210000.00	0.03	1600.00	3414.21	0.30	0.35
70	5.05	31.00	210000.00	0.03	751.47	2000.00	0.30	0.35
71	5.05	31.00	210000.00	0.04	1600.00	2000.00	0.30	0.35
72	5.05	31.00	68578.64	0.03	1600.00	2000.00	0.30	0.35
73	5.05	31.00	210000.00	0.01	1600.00	2000.00	0.30	0.35
74	5.05	31.00	210000.00	0.03	1600.00	2000.00	0.58	0.35
75	2.22	31.00	210000.00	0.03	1600.00	2000.00	0.30	0.35
76	5.05	31.00	210000.00	0.03	1600.00	2000.00	0.30	0.07
77	5.05	31.00	210000.00	0.03	1600.00	585.79	0.30	0.35
78	5.05	42.31	210000.00	0.03	1600.00	2000.00	0.30	0.35
79	5.05	31.00	351421.36	0.03	1600.00	2000.00	0.30	0.35
80	5.05	31.00	210000.00	0.03	1600.00	2000.00	0.02	0.35
81	7.88	31.00	210000.00	0.03	1600.00	2000.00	0.30	0.35
82	5.05	31.00	210000.00	0.03	1600.00	2000.00	0.30	0.63
83	5.05	31.00	210000.00	0.03	2448.53	2000.00	0.30	0.35
84	5.05	19.69	210000.00	0.03	1600.00	2000.00	0.30	0.35
85	5.05	31.00	210000.00	0.03	1600.00	2000.00	0.30	0.35

Tabla B.4: Propiedades de simulación para el Lote 3



ID	$Q_{hvac}$ (kWh)	$Q_{cal}$ (kWh)	$Q_{ref}$ (kWh)	$B_{hvac}$ (kWh)	$U_{ex}$ (W/m <sup>2</sup> K)
1	1499.913	1130.452	369.462	53.266	0.04250
2	832.313	604.602	227.711	29.304	0.01830
3	1072.510	764.564	307.946	36.252	0.02560
4	952.950	626.522	326.428	28.941	0.02040

Tabla B.5: Resultados de las simulaciones del Lote 0

ID	$Q_{hvac}$ (kWh)	$Q_{cal}$ (kWh)	$Q_{ref}$ (kWh)	$B_{hvac}$ (kWh)	$U_{ex}$ (W/m <sup>2</sup> K)
1	1311.093	994.059	317.035	47.030	0.03540
2	1222.249	961.141	261.108	45.952	0.03380
3	1161.728	872.211	289.517	41.459	0.02850
4	1336.826	1008.256	328.570	47.564	0.03540
5	1117.058	831.570	285.488	39.558	0.02590
6	1289.376	976.990	312.386	46.265	0.03450
7	1154.957	910.679	244.278	43.747	0.03170
8	1365.377	1030.815	334.562	48.618	0.03690
9	1310.080	989.860	320.220	46.841	0.03530
10	1182.876	927.734	255.142	44.379	0.03150
11	1213.090	944.363	268.728	45.098	0.03230
12	1289.083	975.259	313.824	46.128	0.03400
13	1267.980	965.086	302.893	45.742	0.03270
14	1314.343	1039.935	274.408	49.599	0.03770
15	1289.225	999.591	289.634	47.470	0.03530
16	1138.046	890.479	247.566	42.725	0.03030
17	1359.861	1049.389	310.472	49.666	0.03780
18	1289.225	999.591	289.634	47.470	0.03530
19	1332.737	1049.588	283.150	49.966	0.03830
20	1115.062	831.571	283.492	39.577	0.02590
21	1308.114	989.895	318.220	46.850	0.03540
22	1234.435	959.986	274.449	45.782	0.03290
23	1285.788	975.379	310.410	46.161	0.03410
24	1217.989	944.189	273.800	45.038	0.03200
25	1293.113	976.936	316.177	46.236	0.03440
26	1184.126	927.905	256.220	44.366	0.03170
27	1242.073	967.018	275.055	46.135	0.03370
28	1325.136	1039.869	285.267	49.470	0.03790
29	1337.681	1008.448	329.233	47.567	0.03540
30	1161.909	872.168	289.741	41.457	0.02850
31	1176.411	909.021	267.389	43.467	0.03070
32	1364.523	1030.651	333.872	48.621	0.03690
33	1313.955	994.003	319.951	47.005	0.03530
34	1129.805	890.970	238.835	42.831	0.03040
35	1273.199	959.063	314.136	45.355	0.03280
36	1235.528	975.832	259.696	46.678	0.03440
37	1371.891	1039.754	332.137	49.078	0.03760
38	1253.983	943.821	310.161	44.662	0.03210
39	1260.994	995.025	265.970	47.524	0.03590
40	1279.639	1010.337	269.302	48.216	0.03600
41	1279.878	988.887	290.991	46.997	0.03480
42	1175.087	889.278	285.809	42.306	0.02980
43	1289.225	999.591	289.634	47.470	0.03530
44	1123.877	873.107	250.769	41.887	0.02880
45	1386.959	1049.923	337.036	49.541	0.03830
46	1200.768	909.060	291.709	43.225	0.03130
47	1235.006	925.365	309.641	43.743	0.03030
48	1242.430	977.461	264.969	46.727	0.03480
49	1088.491	832.092	256.400	39.858	0.02640
50	1330.122	1031.232	298.890	48.915	0.03690
51	1285.111	966.519	318.592	45.710	0.03360
52	1130.231	873.419	256.813	41.834	0.02890
53	1259.038	975.376	283.661	46.446	0.03370
54	1233.051	976.573	256.478	46.720	0.03490
55	1299.929	1009.347	290.582	47.952	0.03550
56	1262.714	994.697	268.016	47.501	0.03560
57	1371.389	1039.870	331.519	49.083	0.03760
58	1385.173	1049.861	335.312	49.565	0.03840
59	1255.386	943.744	311.642	44.648	0.03200
60	1202.640	909.049	293.590	43.212	0.03120
61	1174.734	889.246	285.487	42.304	0.02980
62	1281.598	966.715	314.883	45.748	0.03370
63	1289.225	999.591	289.634	47.470	0.03530
64	1233.266	925.603	307.663	43.773	0.03040
65	1070.517	833.331	237.186	40.075	0.02730
66	1275.820	958.853	316.967	45.323	0.03280
67	1275.303	988.780	286.523	47.062	0.03460
68	1319.063	1030.634	288.429	49.003	0.03670
69	1255.500	985.493	270.007	46.962	0.03430
70	1327.630	1015.290	312.341	48.058	0.03650
71	1180.233	919.431	260.802	43.963	0.03060
72	1305.366	999.148	306.218	47.302	0.03480
73	1442.622	1097.114	345.508	51.703	0.04060
74	1356.668	1052.735	303.933	49.869	0.03820
75	1269.565	951.541	318.025	44.979	0.03250
76	1285.797	999.791	286.006	47.514	0.03550
77	1325.610	1019.915	305.695	48.362	0.03750
78	1299.376	974.603	324.773	46.113	0.03350
79	1285.060	999.940	285.121	47.525	0.03550
80	583.544	294.148	289.396	13.238	-0.00317
81	1255.251	958.217	297.034	45.501	0.03330
82	1290.745	999.514	291.231	47.451	0.03520
83	1265.290	987.041	278.249	46.972	0.03410
84	1216.429	1000.646	215.783	48.380	0.03390
85	1289.225	999.591	289.634	47.470	0.03530

Tabla B.6: Resultados de las simulaciones del Lote 1



ID	$Q_{hvac}$ (kWh)	$Q_{cal}$ (kWh)	$Q_{ref}$ (kWh)	$B_{hvac}$ (kWh)	$U_{ex}$ (W/m <sup>2</sup> K)
1	1132.361	990.760	141.601	47.949	0.03420
2	820.906	814.887	6.019	39.128	0.01970
3	667.026	641.508	25.518	32.149	0.01350
4	831.649	826.302	5.348	39.636	0.01960
5	838.954	834.593	4.360	39.999	0.01950
6	839.569	836.174	3.394	40.069	0.01890
7	917.004	677.746	239.259	32.322	0.01550
8	841.033	836.651	4.382	40.094	0.01980
9	537.150	395.042	142.108	19.731	0.00279
10	1146.681	991.318	155.363	47.774	0.03360
11	827.198	821.921	5.277	39.391	0.01860
12	1077.065	877.911	199.154	42.078	0.02720
13	1085.842	860.437	225.405	40.985	0.02370
14	714.446	337.586	376.860	14.663	-0.00013
15	1203.350	989.201	214.149	47.679	0.03400
16	789.668	432.507	357.161	19.588	0.00661
17	1279.192	992.858	286.334	46.707	0.02740
18	1042.223	882.968	159.255	42.517	0.02690
19	839.730	496.034	343.695	22.958	-0.00540
20	592.777	496.934	95.843	23.906	0.00440
21	739.061	409.907	329.154	18.990	0.00276
22	569.022	482.426	86.596	23.267	0.00343
23	750.440	567.697	182.743	27.586	0.00947
24	472.911	221.148	251.763	10.233	-0.01280
25	1157.401	953.786	203.615	46.001	0.02780
26	1171.874	985.589	186.285	47.397	0.03400
27	775.335	621.542	153.793	29.482	0.01110
28	1197.760	1000.442	197.317	47.978	0.03280
29	667.026	641.508	25.518	32.149	0.01350
30	841.105	837.018	4.086	40.110	0.01950
31	838.754	835.594	3.160	40.042	0.01880
32	840.349	836.525	3.824	40.077	0.01960
33	757.755	745.232	12.522	35.818	0.01530
34	1179.425	984.927	194.499	47.320	0.03430
35	847.540	843.625	3.915	40.408	0.01980
36	834.821	830.061	4.760	39.774	0.01930
37	696.692	326.266	370.426	14.185	-0.00063
38	667.026	641.508	25.518	32.149	0.01350
39	849.959	846.605	3.354	40.542	0.01960
40	844.940	840.799	4.142	40.281	0.02000
41	925.298	764.566	160.733	37.150	0.02130
42	776.765	426.202	350.563	19.355	0.00631
43	1202.071	1034.296	167.775	49.898	0.03780
44	858.341	855.256	3.085	40.937	0.02000
45	1103.856	918.524	185.332	44.139	0.03170
46	1315.325	1041.183	274.142	49.647	0.03220
47	562.365	329.716	232.649	15.870	-0.00618
48	814.731	810.199	4.533	38.898	0.01820
49	979.991	817.576	162.415	39.579	0.02430
50	951.922	788.596	163.326	38.336	0.02360
51	1156.822	918.319	238.503	43.973	0.02710
52	813.364	807.669	5.695	38.805	0.01930
53	810.479	802.677	7.802	38.497	0.01780
54	1103.685	904.895	198.790	43.501	0.02510
55	544.915	515.798	29.117	25.788	0.00648
56	1006.667	804.386	202.281	38.597	0.02440
57	667.026	641.508	25.518	32.149	0.01350
58	575.485	439.313	136.173	21.923	0.00410
59	795.674	601.691	193.984	28.661	0.01080
60	823.066	817.461	5.604	39.238	0.01930
61	1168.568	947.329	221.239	45.616	0.02540
62	1249.580	1064.796	184.783	51.345	0.03910
63	976.367	733.107	243.260	34.920	0.01680
64	823.481	819.543	3.938	39.318	0.01830
65	1049.242	887.832	161.410	42.996	0.02890
66	573.089	472.733	100.356	22.886	0.00419
67	1039.643	801.439	238.203	38.136	0.02110
68	722.978	389.053	333.925	17.917	0.00166
69	525.735	500.118	25.617	24.945	0.00607
70	1174.140	943.003	231.137	45.464	0.02470
71	1309.064	1060.157	248.907	51.075	0.03720
72	665.862	641.159	24.703	32.130	0.01340
73	1076.307	772.805	303.502	36.486	0.01960
74	664.762	645.660	19.102	31.758	0.01320
75	502.082	413.168	88.914	20.560	0.00681
76	907.484	888.967	18.517	43.357	0.02530
77	672.079	646.360	25.719	32.366	0.01390
78	667.026	641.508	25.518	32.149	0.01350
79	342.340	284.940	57.399	14.497	-0.00538
80	582.194	561.277	20.918	27.766	0.00892
81	748.433	719.926	28.508	36.372	0.01760
82	1200.462	782.648	417.813	35.642	0.01430
83	378.566	279.325	99.241	14.290	-0.00595
84	1221.750	928.515	293.235	43.894	0.02820
85	676.223	653.618	22.605	32.754	0.01330

Tabla B.7: Resultados de las simulaciones del Lote 2

ID	$Q_{hvac}$ (kWh)	$Q_{cal}$ (kWh)	$Q_{ref}$ (kWh)	$B_{hvac}$ (kWh)	$U_{ex}$ (W/m <sup>2</sup> K)
1	1207.87	936.94	270.93	44.74	0.03
2	1073.54	893.73	179.81	43.34	0.03
3	993.38	750.76	242.62	36.13	0.02
4	1178.15	925.91	252.24	44.34	0.03
5	894.65	641.04	253.61	30.78	0.02
6	1144.98	885.64	259.34	42.45	0.03
7	963.44	755.07	208.37	36.67	0.02
8	1225.48	954.54	270.93	45.52	0.03
9	1176.86	903.85	273.01	43.16	0.03
10	1029.98	831.01	198.96	40.23	0.03
11	1021.17	824.26	196.91	39.94	0.03
12	1189.91	913.46	276.45	43.60	0.03
13	1116.93	862.07	254.86	41.39	0.03
14	1127.92	930.15	197.77	45.09	0.03
15	1112.71	908.79	203.92	43.94	0.03
16	914.24	671.90	242.35	32.42	0.02
17	1193.64	961.81	231.83	46.39	0.03
18	1112.71	908.79	203.92	43.94	0.03
19	1163.60	961.82	201.77	46.61	0.03
20	883.76	641.06	242.70	30.87	0.02
21	1170.16	903.27	266.89	43.20	0.03
22	1101.24	889.97	211.28	43.00	0.03
23	1179.22	912.34	266.89	43.64	0.03
24	1037.73	822.79	214.94	39.77	0.03
25	1155.63	886.25	269.38	42.38	0.03
26	1025.62	831.53	194.09	40.28	0.03
27	1058.71	870.15	188.56	42.22	0.03
28	1141.40	932.10	209.30	45.10	0.03
29	1180.71	925.89	254.82	44.31	0.03
30	999.68	750.70	248.98	36.08	0.02
31	986.36	755.84	230.53	36.58	0.02
32	1224.58	954.50	270.08	45.52	0.03
33	1215.63	937.50	278.13	44.69	0.03
34	904.97	669.57	235.39	32.31	0.02
35	1126.60	888.52	238.08	42.70	0.03
36	1051.79	837.04	214.75	40.54	0.03
37	1256.87	971.57	285.31	46.22	0.03
38	1058.44	820.93	237.51	39.54	0.03
39	1092.55	893.75	198.80	43.36	0.03
40	1114.15	931.79	182.36	45.14	0.03
41	1092.62	861.33	231.28	41.65	0.03
42	1070.96	778.92	292.04	37.15	0.02
43	1112.71	908.79	203.92	43.94	0.03
44	962.73	754.73	208.00	36.54	0.02
45	1281.15	987.07	294.08	46.88	0.03
46	1087.13	829.10	258.04	39.80	0.03
47	1078.00	828.50	249.50	39.79	0.03
48	1030.85	827.02	203.84	40.16	0.03
49	884.17	644.59	239.58	31.09	0.02
50	1166.75	959.83	206.92	46.36	0.03
51	1113.57	865.84	247.74	41.56	0.03
52	966.47	754.62	211.85	36.52	0.02
53	1120.60	819.54	301.06	39.00	0.02
54	1045.41	842.27	203.14	40.89	0.03
55	1131.94	929.69	202.25	44.91	0.03
56	1093.66	889.27	204.38	43.12	0.03
57	1255.31	970.92	284.39	46.20	0.03
58	1279.17	987.77	291.39	46.92	0.03
59	1063.57	820.80	242.77	39.50	0.03
60	1093.64	827.21	266.43	39.65	0.03
61	1070.77	781.44	289.32	37.29	0.02
62	1103.14	866.13	237.01	41.66	0.03
63	1112.71	908.79	203.92	43.94	0.03
64	1072.97	828.57	244.40	39.83	0.03
65	863.22	648.70	214.52	31.47	0.02
66	1134.35	888.40	245.95	42.63	0.03
67	1075.37	866.53	208.83	42.03	0.03
68	1162.34	959.14	203.20	46.38	0.03
69	1007.82	714.86	292.96	34.18	0.02
70	1193.04	953.82	239.22	45.84	0.03
71	919.89	738.67	181.22	35.94	0.03
72	1135.14	907.85	227.29	43.71	0.03
73	1287.94	1025.53	262.41	49.05	0.04
74	1222.99	996.02	226.97	47.94	0.04
75	1102.39	855.93	246.46	41.05	0.03
76	1102.93	909.42	193.50	44.04	0.03
77	1189.30	950.07	239.23	45.65	0.03
78	1138.26	808.66	329.60	38.18	0.02
79	1106.33	909.12	197.20	44.01	0.03
80	706.34	642.81	63.53	31.64	0.02
81	1123.60	907.21	216.39	43.94	0.03
82	1117.23	908.57	208.67	43.89	0.03
83	1019.55	830.40	189.15	40.24	0.03
84	1369.36	1012.84	356.53	47.05	0.03
85	1112.71	908.79	203.92	43.94	0.03

Tabla B.8: Resultados de las simulaciones del Lote 3

