



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE TRANSFERENCIA
DE CALOR A TRAVÉS DE VENTANAS CON MATERIALES
DE CAMBIO DE FASE Y EVALUACIÓN DE IMPACTO EN EL
DESEMPEÑO TÉRMICO DE LA VENTANA Y ESPACIO DE
OFICINA.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

NICOLÁS HUMBERTO BENAVENTE MONROY

PROFESOR GUÍA:

SERGIO EDUARDO VERA ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

WALDO ENRIQUE BUSTAMANTE GÓMEZ

JORGE OSVALDO PULGAR ALLENDES

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil, mención estructuras,
construcción y geotecnia.
POR: Nicolás Humberto Benavente Monroy
FECHA: 30/04/2018

**IMPLEMENTACIÓN MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR A TRAVÉS DE
VENTANA CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE Y EVALUACIÓN DE IMPACTO
EN DESEMPEÑO TÉRMICO DE LA VENTANA Y ESPACIO OFICINA**

El contexto general del problema que se quiere resolver en este trabajo de titulación está basado en la sustentabilidad aplicada en la construcción. El aporte informativo sobre materiales de cambio de fase PCM (Phase Change Materials) aplicados como materiales de construcción es una de las motivaciones de este trabajo, considerando que no existe más información sobre estos materiales aplicados bajo las características particulares de Chile. Es por ello por lo que se analizará la situación actual del país, con el objetivo de introducir al lector al contexto particular del problema que se busca resolver en el presente trabajo, el cual corresponde a la falta de un modelo de transferencia de calor para materiales de cambio de fase incorporados a ventanas.

El objetivo principal de este trabajo de titulación es la implementación de un modelo de transferencia de calor para materiales de cambio de fase que están incorporados a ventanas en espacios de oficina, además se compararan resultados para distintos casos de estudio, incorporando al modelo distintos tipos de PCM, distintos climas, distintas épocas del año y distintas orientaciones de la ventana en el espacio de oficina.

La metodología aplicada para desarrollar el trabajo de titulación consiste en una etapa de revisión bibliográfica, definición de las variables del modelo, validación del modelo sin PCM por medio de la comparación de temperaturas de la superficie interior de la ventana modelada en EnergyPlus y en Matlab, implementación de modelo en Matlab con la incorporación de materiales de cambio de fase, cálculo de confort térmico por medio del cálculo de índices como el voto estimado medio PMV (Predicted Mean Vote).

Los resultados obtenidos de este trabajo muestran que dependiendo de las características del PCM, como la temperatura de activación o el calor latente del material se logra una mayor o menor reducción en los peaks de temperatura de la superficie de la ventana. En el caso de Santiago se obtiene una reducción del promedio de peaks de temperatura superficial de la ventana de 14°C al comparar un modelo con y sin PCM, esta reducción tiene un impacto en el confort térmico obteniendo una reducción del índice PMV de 1.5 a 0.9, lo cual es una mejora considerable al aplicar materiales de cambio de fase. Se generan resultados para distintos casos como se mencionó anteriormente y se obtienen resultados que indican que incorporar PCM al modelo reduce las temperaturas de la superficie de la ventana y en consecuencia genera una mejora en el confort térmico.

Tabla de Contenido

Resumen.....	II
Índice Tablas	V
Índice Figuras.....	VI
1. Introducción	1
2. Marco teórico	3
2.1 Materiales de cambio de fase (PCM)	3
2.2 Modelos de transferencia de calor en estructuras con PCM.....	4
3. Objetivos	11
3.1 Objetivo General	11
3.2 Objetivos Específicos.....	11
4. Hipótesis.....	11
5. Metodología de Trabajo	12
5.1 Oficina.....	13
5.2 Ciudades	14
5.3 PCMs.....	15
5.4 Modelo de transferencia de calor	15
5.5 EnergyPlus	16
5.6 Verificación modelo sin PCM.....	16
5.7 Confort Térmico.....	17
5.8 Análisis de resultados:.....	19
6. Estructura de la tesis.....	19
7. Modelo Numérico	20
7.1 Modelo	21
7.1.1 Problema de linealidad	29
7.2 Cambio de Fase	31
8. Resultados	34
8.1 Temperatura de la superficie interior de la ventana	34
8.1.1 Santiago, Temperatura superficie interior ventana.....	35
8.1.2 Santiago, PMV	38
9.2.1 Concepción, Temperatura superficie interior ventana.....	41
9.2.2 Concepción, PMV	44

9.3.1	Copiapó, Temperatura superficie interior ventana	47
9.3.2	Copiapó, PMV	50
9.4.1	Boulder, Temperatura superficie interior ventana.....	53
9.4.2	Boulder, PMV	56
9.5.1	Vancouver, Temperatura superficie interior ventana	59
9.5.2	Vancouver, PMV.....	62
9.3.1	El Paso, Temperatura superficie interior ventana.....	65
9.3.2	El Paso, PMV	68
10	Análisis Resultados	72
11	Conclusiones	75
12	Bibliografía	77
12	Anexo	78
12.1	AIRv_15.m.....	78
12.2	PCMv8.m	86
12.3	entlPCMv2.m	94
12.4	interpDATOSv6.m	96
12.5	PMV.m	112

Índice Tablas

TABLA 1: CIUDADES Y CLIMAS.	14
TABLA 2: FECHAS SEMANAS REPRESENTATIVAS.....	14
TABLA 3: TIPOS DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE, CON TEMPERATURA DE FUSIÓN Y CALOR LATENTE RESPECTIVOS.	15
TABLA 4: RMSE PARA DATOS ANUALES, SEGÚN CIUDAD Y ORIENTACIÓN DE VENTANA EN ESPACIO DE OFICINA.	17
TABLA 5: ESCALA DE SENSACION TERMICA DE SIETE NIVELES. ADAPTADO DE NORMA ISO 7730.....	18
TABLA 6: TEMPERATURAS SUPERFICIE INTERIOR MURO VENTANA, SANTIAGO, ORIENTACIONES DE VENTANA NORTE Y PONIENTE.....	37
TABLA 7: ÍNDICES PMV, SANTIAGO, ORIENTACIONES DE VENTANA NORTE Y PONIENTE.....	40
TABLA 8: TEMPERATURAS SUPERFICIE INTERIOR MURO VENTANA, CONCEPCIÓN, ORIENTACIONES DE VENTANA NORTE Y PONIENTE.....	43
TABLA 9: ÍNDICES PMV, CONCEPCIÓN, ORIENTACIONES DE VENTANA NORTE Y PONIENTE...	46
TABLA 10: TEMPERATURAS SUPERFICIE INTERIOR MURO VENTANA, COPIAPÓ, ORIENTACIONES DE VENTANA NORTE Y PONIENTE.....	49
TABLA 11: ÍNDICES PMV, COPIAPÓ, ORIENTACIONES DE VENTANA NORTE Y PONIENTE	52
TABLA 12: TEMPERATURAS SUPERFICIE INTERIOR MURO VENTANA, BOULDER, ORIENTACIONES DE VENTANA SUR Y PONIENTE	55
TABLA 13: ÍNDICES PMV, BOULDER, ORIENTACIONES DE VENTANA SUR Y PONIENTE	58
TABLA 14: TEMPERATURAS SUPERFICIE INTERIOR MURO VENTANA, VANCOUVER, ORIENTACIONES DE VENTANA SUR Y PONIENTE	61
TABLA 15: ÍNDICES PMV, VANCOUVER, ORIENTACIONES DE VENTANA SUR Y PONIENTE	64
TABLA 16: TEMPERATURAS SUPERFICIE INTERIOR MURO VENTANA, EL PASO, ORIENTACIONES DE VENTANA SUR Y PONIENTE	67
TABLA 17: ÍNDICES PMV, EL PASO, ORIENTACIONES DE VENTANA SUR Y PONIENTE	71
TABLA 18: DESCRIPCIÓN DE SCRIPT DE MATLAB DESARROLLADOS PARA ESTE TRABAJO DE TITULACIÓN.....	78

Índice Figuras

FIGURA 1 CONFIGURACIÓN DE LA VENTANA TESTEADA Y LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA (TEMP) Y FLUJO DE CALOR (HF) TABARES-VELASCO ET AL. (2012).	4
FIGURA 2 ESQUEMA DE MODELO DE NODOS PARA SISTEMA DE DOBLE VIDRIADO CON CAVIDAD INTERIOR DE AIRE O PCM, FRANCESCO GOIA ET AL. (2012)	5
FIGURA 3 ESQUEMA DE MODELO DESARROLLADO POR LIU ET AL. (2016A).....	6
FIGURA 4 DOS EJEMPLOS DE VENTANAS CON PCM, A LA IZQUIERDA SE VE EL PCM EN ESTADO SOLIDÓ Y A LA DERECHA EN ESTADO LÍQUIDO, (GOIA ET AL., 2015).....	7
FIGURA 5 ESQUEMA DE MODELO DE VENTANA, ZHONG ET AL. (2015).....	9
FIGURA 6 DW: DOUBLE PANE WINDOW (DOS PANELES DE VIDRIO CON CAVIDAD INTERIOR), TW: TRIPLE PANE WINDOW (TRES PANELES DE VIDRIO CON DOS CAVIDADES INTERIORES), LI ET AL. (2016).	10
FIGURA 7 ESQUEMA METODOLOGÍA DEL TRABAJO.	12
FIGURA 8 ESQUEMA DE MODELACIÓN TRANSFERENCIA DE CALOR PARA VENTANA CON Y SIN PCM.	12
FIGURA 9 GEOMETRÍA DEL ESPACIO DE OFICINA.	13
FIGURA 10 ESQUEMA MÉTODO CRANK-NICOLSON, PARA CALCULAR EL PUNTO (J,N+1) SE NECESITA INFORMACIÓN DE LOS PASOS ANTERIORES (J+1,N), (J,N), (J-1,N) Y DE LAS CONDICIONES DE BORDE (J+1,N+1) Y (J-1,N+1).	21
FIGURA 11 ESQUEMA DE CÓMO SE CONSIDERÓ LA DERIVADA DE LA CURVA.	22
FIGURA 12 REPRESENTACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS NODOS EN EL MODELO DE MURO VENTANA.	25
FIGURA 13 ESQUEMA DE LOS MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR CONSIDERADOS PARA EL DESARROLLO DEL MODELO.	26
FIGURA 14 CURVA ENTALPÍA VS TEMPERATURA TÍPICA PARA PCM	32
FIGURA 15 CURVA ENTALPÍA VS TEMPERATURA, PARA DISTINTOS PUNTOS DE LA CURVA.	32
FIGURA 16 GRAFICO ENTALPÍA VS TEMPERATURA PARA MATERIAL CON ALTAS TEMPERATURAS.	33
FIGURA 17 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: SANTIAGO. ORIENTACIÓN VENTANA: NORTE. SEMANA REPRESENTATIVA INVIERNO.....	35
FIGURA 18 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: SANTIAGO. ORIENTACIÓN VENTANA: NORTE. SEMANA REPRESENTATIVA VERANO.....	35
FIGURA 19 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: SANTIAGO. ORIENTACIÓN VENTANA: PONIENTE. SEMANA REPRESENTATIVA INVIERNO.....	36
FIGURA 20 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: SANTIAGO. ORIENTACIÓN VENTANA: PONIENTE. SEMANA REPRESENTATIVA VERANO.....	36
FIGURA 21 RT25, SANTIAGO, NORTE.	38
FIGURA 22 RT25, SANTIAGO, PONIENTE.	38
FIGURA 23 RT25HC, SANTIAGO, NORTE.	39
FIGURA 24 RT25HC, SANTIAGO, PONIENTE.	39

FIGURA 25 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: CONCEPCIÓN. ORIENTACIÓN VENTANA: NORTE. SEMANA REPRESENTATIVA INVIERNO.	41
FIGURA 26 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: CONCEPCIÓN. ORIENTACIÓN VENTANA: NORTE. SEMANA REPRESENTATIVA VERANO.	41
FIGURA 27 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: CONCEPCIÓN. ORIENTACIÓN VENTANA: PONIENTE. SEMANA REPRESENTATIVA INVIERNO.	42
FIGURA 28 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: CONCEPCIÓN. ORIENTACIÓN VENTANA: PONIENTE. SEMANA REPRESENTATIVA VERANO.	42
FIGURA 29 RT25, CONCEPCIÓN, NORTE.	44
FIGURA 30 RT25, CONCEPCIÓN, PONIENTE.	44
FIGURA 31 RT25HC, CONCEPCIÓN, NORTE.	45
FIGURA 32 RT25HC, CONCEPCIÓN, PONIENTE.	45
FIGURA 33 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: COPIAPÓ. ORIENTACIÓN VENTANA: NORTE. SEMANA REPRESENTATIVA INVIERNO.	47
FIGURA 34 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: COPIAPÓ. ORIENTACIÓN VENTANA: NORTE. SEMANA REPRESENTATIVA VERANO.	47
FIGURA 35 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: COPIAPÓ. ORIENTACIÓN VENTANA: PONIENTE. SEMANA REPRESENTATIVA INVIERNO.	48
FIGURA 36 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: COPIAPÓ. ORIENTACIÓN VENTANA: PONIENTE. SEMANA REPRESENTATIVA VERANO.	48
FIGURA 37 RT25, COPIAPÓ, NORTE.	50
FIGURA 38 RT25, COPIAPÓ, PONIENTE.	50
FIGURA 39 RT25HC, COPIAPÓ, NORTE.	51
FIGURA 40 RT25HC, COPIAPÓ, PONIENTE.	51
TABLA 11: ÍNDICES PMV, COPIAPÓ, ORIENTACIONES DE VENTANA NORTE Y PONIENTE.	52
FIGURA 41 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: BOULDER. ORIENTACIÓN VENTANA: PONIENTE. SEMANA REPRESENTATIVA INVIERNO.	53
FIGURA 42 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: BOULDER. ORIENTACIÓN VENTANA: PONIENTE. SEMANA REPRESENTATIVA VERANO.	53
FIGURA 43 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: BOULDER. ORIENTACIÓN VENTANA: SUR. SEMANA REPRESENTATIVA INVIERNO.	54
FIGURA 44 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: BOULDER. ORIENTACIÓN VENTANA: SUR. SEMANA REPRESENTATIVA VERANO.	54
FIGURA 45 RT25, BOULDER, SUR.	56
FIGURA 46 RT25, BOULDER, PONIENTE.	56

FIGURA 47 RT25HC, BOULDER, SUR.	57
FIGURA 48 RT25HC, BOULDER, PONIENTE.	57
FIGURA 49 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: VANCOUVER. ORIENTACIÓN VENTANA: PONIENTE. SEMANA REPRESENTATIVA INVIERNO.	59
FIGURA 50 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: VANCOUVER. ORIENTACIÓN VENTANA: PONIENTE. SEMANA REPRESENTATIVA VERANO.	59
FIGURA 51 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: VANCOUVER. ORIENTACIÓN VENTANA: SUR. SEMANA REPRESENTATIVA INVIERNO.	60
FIGURA 52 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: VANCOUVER. ORIENTACIÓN VENTANA: SUR. SEMANA REPRESENTATIVA VERANO.	60
FIGURA 53 RT25, VANCOUVER, SUR.	62
FIGURA 54 RT25, VANCOUVER, PONIENTE.	62
FIGURA 55 RT25HC, VANCOUVER, SUR.	63
FIGURA 56 RT25HC, VANCOUVER, PONIENTE.	63
FIGURA 57 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: EL PASO. ORIENTACIÓN VENTANA: PONIENTE. SEMANA REPRESENTATIVA INVIERNO.	65
FIGURA 58 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: EL PASO. ORIENTACIÓN VENTANA: PONIENTE. SEMANA REPRESENTATIVA VERANO.	65
FIGURA 59 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: EL PASO. ORIENTACIÓN VENTANA: SUR. SEMANA REPRESENTATIVA INVIERNO.	66
FIGURA 60 RESULTADOS MODELO VENTANA DOBLE PANEL DE VIDRIO, COMPARACIÓN ENTRE MODELO CON AIRE Y MODELOS CON PCM. UBICACIÓN: EL PASO. ORIENTACIÓN VENTANA: SUR. SEMANA REPRESENTATIVA VERANO.	66
FIGURA 61 RT25, EL PASO, SUR.	68
FIGURA 62 RT25, EL PASO, PONIENTE.	68
FIGURA 63 RT25HC, EL PASO, SUR.	69
FIGURA 64 RT25HC, EL PASO, PONIENTE.	69
FIGURA 65 RT31, EL PASO, SUR.	70
FIGURA 66 RT31, EL PASO, PONIENTE.	70
FIGURA 67 DETALLE DEL EFECTO DEL PCM PARA EL CASO VISTO EN FIGURA 17.	72
FIGURA 68 SANTIAGO, ORIENTACIÓN VENTANA NORTE, SEMANA REPRESENTATIVA DE INVIERNO, CARGA Y DESCARGA DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE.	73

1. Introducción

La sustentabilidad es un tema de gran importancia para Chile y que cada día toma mayor relevancia dentro de las prioridades de nuestra sociedad. Esto se ve reflejado en las políticas implementadas durante el último tiempo en materia de energía y recursos naturales, las cuales apuntan a un uso más eficiente de nuestros recursos, por medio del desarrollo tecnológico y la educación de la población. Se tienen iniciativas como el de Energía 2050, lanzada en julio de 2014 y que busca dar paso a un proceso de construcción de política energética acorde a las necesidades del país.

El escenario actual del país plantea un desafío en cuanto a sustentabilidad de los recursos y el área de la construcción es un sector desde el cual se pueden hacer grandes aportes, por ejemplo, al implementar nuevas tecnologías que permitan hacer un uso más eficiente de los recursos energéticos, y de esta manera, reducir las consecuencias negativas generadas por un uso excesivo y poco eficiente de los recursos energéticos.

En este trabajo de titulación se estudian las características de ventanas con materiales de cambio de fase y la forma en que se pueden integrar a un modelo de transferencia de calor, en particular se busca incorporar PCM a un modelo de ventana de doble panel de vidrio. Se eligieron los materiales de cambio de fase por su característica de almacenamiento de calor, el cual es una característica asociada al alto calor latente de estos materiales. Además de acumular energía, los PCM tienen una fase de carga y descarga energética, lo cual los hace materiales aptos para ser usados diariamente y regular la temperatura de espacios de oficina.

Los “Materiales de Cambio de Fase” corresponden a elementos que cambian de fase líquido-sólido entre rangos de -10°C y 90°C , poseen calores latentes de entre 100 y 200 kJ/kg usualmente y se les puede encontrar de forma comercial como ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos.

Como ya se mencionó, el alto calor latente en los PCM permite la acumulación y liberación de energía durante el cambio de fase. La energía es acumulada cuando el material se solidifica y se libera cuando el material se funde, por tanto, se pueden utilizar en envolventes de edificios, ya que absorbe energía del ambiente interior cuando la temperatura exterior se incrementa y la libera cuando la temperatura exterior decrece. Esta característica permite regular las condiciones térmicas al interior del edificio. Además, los materiales de cambio de fase cuentan con características asociadas al control de luz natural, es así como al encontrarse en estado sólido bloquean de forma parcial el paso de luz natural, y al estar en estado líquido se vuelve un material translúcido, permitiendo la transmisión de luz natural. Estas características hacen que sea común su uso en elementos opacos de la envolvente como muros y techumbres.

Teniendo presente la voluntad que existe por realizar un trabajo que aporte en la línea de la sustentabilidad en la construcción y las características que presenta el PCM como material de construcción es que se realiza este trabajo de titulación, el cual busca implementar un modelo de transferencia de calor de ventanas con PCM en edificaciones. Se investiga el desempeño de ventanas con PCM disponibles comercialmente sobre el confort térmico en edificación de

oficinas en tres tipos de climas para 6 ciudades distintas: Santiago, Concepción y Copiapó en Chile, El Paso y Boulder en Estados Unidos, y Vancouver en Canadá, a través del modelo desarrollado.

Para estudiar el desempeño térmico se realizan modelaciones con Matlab, usando datos extraídos de modelos desarrollados en EnergyPlus, los cuales no incorporan el PCM a su análisis. Es importante mencionar que el modelo se desarrolla en Matlab debido a que EnergyPlus, a la fecha en que se desarrolla este trabajo no incorpora el PCM a ventanas para hacer análisis de desempeño energético de edificios.

Para poder reproducir el comportamiento de ventanas con PCM integradas a edificios, se utilizarán ecuaciones de transferencia de calor, en particular se utilizará la ecuación del calor desarrollada en base a la ley de Fourier y el principio de conservación de la energía, esta es una ecuación diferencial que está expresada en derivadas parciales en el tiempo y el espacio y explica el flujo de calor en una determinada zona y determinado tiempo bajo ciertas condiciones iniciales y condiciones de borde.

Para hacer un análisis más completo de los resultados que se obtienen del modelo se incluye en este trabajo de titulación el cálculo de confort térmico en espacios de oficina que tienen incorporadas ventanas con PCM. El análisis del confort térmico al interior de la edificación se hace por medio del índice Voto Medio Estimado (PMV por sus siglas en inglés), el cual, según el valor del PCM indica el estado de confort térmico que tendrán las personas al interior del espacio de oficina.

Antes de presentar el modelo realizado es necesario entregar información en detalle sobre los materiales de cambio de fase, además se presenta información sobre modelos de transferencia de calor en PCM desarrollados en otros trabajos que ayudan a entender el trabajo realizado. Toda esta información se encuentra presente en el siguiente capítulo correspondiente a Marco Teórico.

2. Marco teórico

2.1 Materiales de cambio de fase (PCM)

Los materiales de cambio de fase o PCM por sus siglas en inglés (Phase Change Materials) corresponden a materiales que gracias a su alto calor latente pueden almacenar energía térmica. En la actualidad existen varios sistemas de almacenamiento de calor, por ejemplo, existen sistemas de tanques de agua o lecho de piedras que permiten almacenar calor o reacciones termoquímicas, sin embargo, estos métodos tienen la desventaja de necesitar grandes volúmenes de masa (en el caso de tanques de agua) o requerir de elevadas temperaturas (reacciones termoquímicas), en comparación a estos sistemas, el PCM que trabaja por medio del calor latente presenta considerables ventajas.

El calor latente es la cantidad de energía requerida por una cierta cantidad de sustancia de un determinado material para cambiar de fase o de estructura molecular. También puede definirse como la cantidad de energía que se almacena en una sustancia al momento en que esta cambia de fase.

Por lo tanto, el PCM, por medio del calor latente presenta ventajas como, por ejemplo, la alta densidad de almacenamiento que permite tener volúmenes pequeños de almacenamiento de calor o la posibilidad de cargar y descargar el material de forma cíclica. García Santos et al., (2012) se trata sobre las características de los tipos de PCM, de las cuales se dará detalle a continuación.

En particular para este trabajo de titulación se analiza el PCM en su cambio de fase de sólido a líquido, si bien este cambio de fase es menos energético que el de líquido a gaseoso, es más práctico debido que al aplicarlo a una estructura rígida como una ventana es necesario que el cambio de fase no presente grandes variaciones en el volumen del material.

Existen varios tipos de materiales de cambio de fase. Estos pueden clasificarse en orgánicos e inorgánicos, ambos presentan ventajas y desventajas que se deben considerar al momento de elegir para su aplicación.

Entre los PCM inorgánicos, se encuentran principalmente las sales hidratadas. En comparación a PCM orgánicos, las sales hidratadas tienen un menor costo económico, capacidad de almacenamiento térmico mayor, elevada conductividad térmica, temperatura de cambio de fase bien definida, no son inflamables y suelen ser biodegradables. Sin embargo, presentan desventajas como, por ejemplo, su uso prolongado requiere de aditivos (alguno de los cuales reduce su capacidad de almacenamiento térmico), presentan problemas de subenfriamiento (el subenfriamiento ocurre cuando el PCM en estado líquido está por debajo de la temperatura de solidificación, lo cual altera el ciclo de carga y descarga térmica) y son potencialmente corrosivos con algunos metales.

Entre los PCM orgánicos, están presentes las parafinas y los ácidos grasos. Los PCM orgánicos son más fáciles de usar y son más estables químicamente, además no sufren del fenómeno de subenfriamiento, no son corrosivos y son ecológicamente inocuos. Como desventaja presentan una menor capacidad de almacenamiento térmico, baja conductividad térmica, grandes cambios

de volúmenes al cambiar de fase, tienen un mayor costo, potencialmente combustibles y pueden reaccionar con el hormigón.

2.2 Modelos de transferencia de calor en estructuras con PCM

Se buscó en la literatura sobre modelos de transferencia de calor en donde se utiliza PCM como método de almacenamiento de energía. El PCM se estudia como método de almacenamiento de energía y mejora del rendimiento energético para distintos tipos de estructuras, por ejemplo, techos, muros y ventanas. A continuación, se muestran algunos modelos que sirven como información útil para el modelo de transferencia de calor desarrollado en este trabajo de titulación.

Uno de los modelos estudiados para este trabajo es el desarrollado por Tabares-Velasco et al., (2012). En este artículo se crea un modelo de transferencia de calor para muros opacos, considerando el efecto del material de cambio de fase, para ello se desarrolla la ecuación diferencial del calor y se hacen modificaciones que no estaban incorporadas en Energyplus hasta ese momento, en particular se integra el efecto de cambio de fase del material por medio de la entalpía, para calcular el calor específico del PCM.

Este modelo de transferencia de calor utiliza dos métodos de diferencias finitas, uno de ellos es el método de Crank-Nicolson y el otro método corresponde a una solución completamente implícita.

Se presenta una solución numérica de un modelo verificado para calentamiento de PCM y datos experimentales tomados para un muro que tiene en su interior una capa de PCM, en la Figura 1 se muestra un esquema del muro estudiado en este artículo. En general el modelo desarrollado presenta muy buenos resultados en cuanto a temperaturas comparadas entre el modelo y los datos experimentales, sin embargo, los resultados no son igualmente buenos al considerar el flujo de calor. Este modelo de PCM se integró a la versión de EnergyPlus 7.1. Cabe mencionar que de este artículo se obtiene la idea de utilizar Crank-Nicolson como método de diferencias finitas para la ecuación del calor y el método de calor específico para integrar el efecto de cambio de fase al modelo que se desarrolla para este trabajo de titulación.

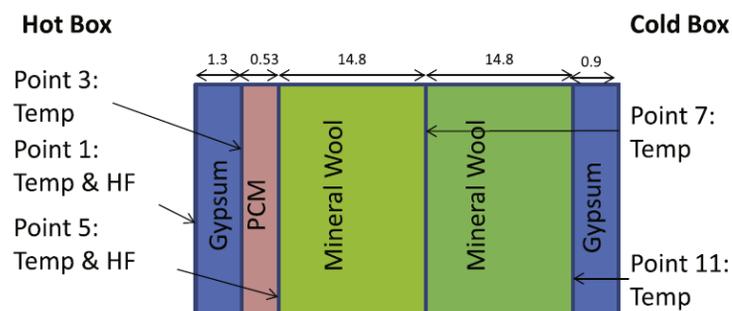


Figura 1 Configuración de la ventana testeada y localización de los puntos de medición de temperatura (Temp) y Flujo de Calor (HF) (Tabares-Velasco et al., 2012).

Francesco Goiaa et al., (2012) muestra un modelo numérico para ventana con PCM. En este artículo se plantea una estructura conformada por un vidrio exterior, cavidad rellena con PCM o aire y vidrio interior, este sistema se divide en nodos como se muestra en la Figura 2.

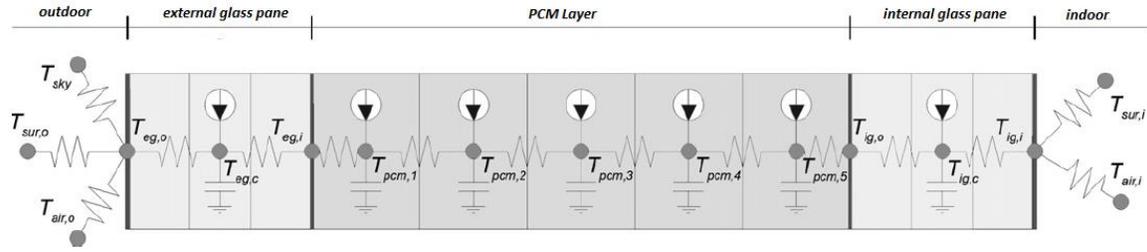


Figura 2 Esquema de modelo de nodos para sistema de doble vidrio con cavidad interior de aire o PCM, (Francesco Goiaa et al., 2012)

Para este modelo se resuelve una ecuación diferencial ordinaria de forma directa para obtener un resultado de temperatura de la superficie interior de la ventana, esta ecuación considera el transporte de onda corta (UV-VIS-NIR), el intercambio de radiación de onda larga, el intercambio de calor por convección y el intercambio de calor por conducción. Al igual que hace Tabares-Velasco et al., (2012), la forma de integrar el análisis del PCM al modelo es por medio de considerar la variación de la entalpía.

Liu et al., (2016b) desarrolla un modelo de doble vidrio e interior de PCM, con la ventana ubicada en el techo. El efecto del PCM se incluye en el modelo por medio de la resolución de una integral en función del calor específico que da como resultado un valor para la entalpía del material. La entalpía se muestra de forma directa en la ecuación del calor utilizada en este artículo, de esta forma se tiene una ecuación para el vidrio, el aire y el PCM, la ecuación (1) se ocupa para aire y vidrio:

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_{sol}}{\rho \cdot c} \quad (1)$$

La ecuación (2) se utiliza para materiales de cambio de fase. Incorpora la entalpía h en lugar de poner la temperatura T directamente.

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_{sol}}{\rho \cdot c} \quad (2)$$

En este artículo se explica de forma simple la utilización de las condiciones de borde para definir las ecuaciones del problema, para la condición de borde exterior (exterior de la ventana) se considera una componente de intercambio de radiación entre la superficie exterior de la ventana y el ambiente exterior, más una componente de convección compuesto por un coeficiente de convección y una diferencia de temperatura entre el aire exterior y la superficie exterior de la ventana. De igual forma para la condición de borde interna se considera una componente de

radiación dada por la emisividad, la constante de Stefan Boltzmann y la diferencia de las temperaturas del aire interior y superficie interior de la ventana elevadas a la cuarta potencia, más una componente de convección dado por un coeficiente de convección interna y la diferencia de las temperaturas del aire interior y de la superficie interior de la ventana.

Ecuación para condición de borde externa, (Liu et al., 2016b).

$$-k_g \frac{\partial T}{\partial x} = q_{rad} + h_{out}(T_{out} - T_{a,out}) \quad (3)$$

Ecuación para condición de borde interna, (Liu et al., 2016b).

$$-k_g \frac{\partial T}{\partial x} = h_{in}(T_{in} - T_{a,in}) + \varepsilon\sigma(T_{in}^4 - T_{a,in}^4) \quad (4)$$

Por otra parte, el mismo autor Liu et al., (2016a) desarrolla un modelo de transferencia de calor con las ecuaciones vistas anteriormente pero para una configuración de múltiples vidrios y cavidades, en la Figura 3 se muestra la geometría del modelo para entender la configuración descrita.

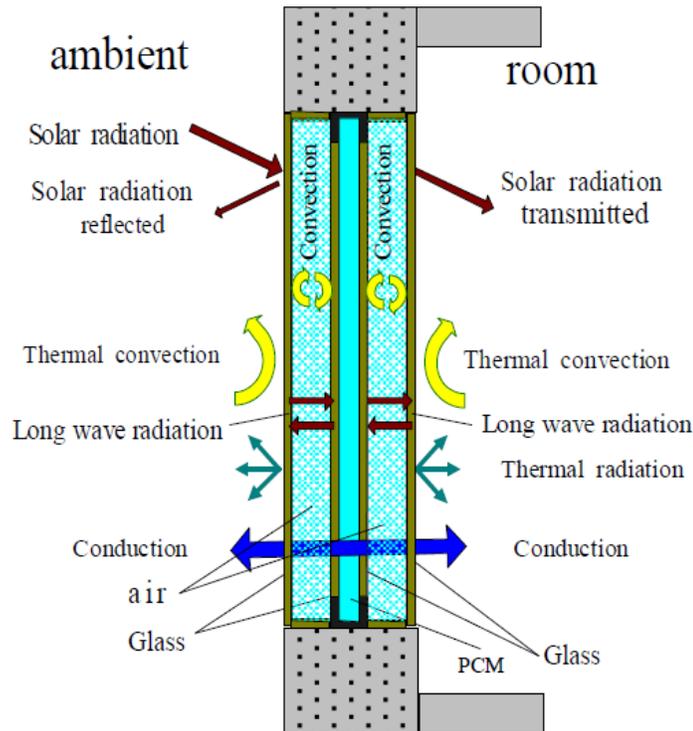


Figura 3 Esquema de modelo desarrollado por Liu et al. (2016a)

Con respecto al análisis del confort térmico, Goia et al., (2013) muestra datos experimentales para estudiar el efecto del PCM al integrarlo a un doble panel de vidrio (doble panel de vidrio

corresponde a una configuración de vidrio interior, cavidad interna y vidrio exterior, como la configuración que se muestra en la Figura 2), se analizan datos de temperaturas superficiales de vidrios y de la irradiancia correspondiente a estas temperaturas. Además, se calcula el voto estimado medio PMV (Predicted mean vote) para analizar el beneficio en el confort térmico que genera el uso de materiales de cambio de fase. Este artículo es importante para comparar resultados con el trabajo de titulación que se desarrolla acá, ya que busca desarrollar un modelo numérico que calcule temperaturas superficiales e índice PMV, al igual que en este trabajo de titulación, con la diferencia de que se modela para condiciones distintas y además Goia et al., (2013) no hace tanto énfasis en la modelación como se hace en el presente trabajo.

Goia et al., (2015) analiza las propiedades lumínicas del PCM por medio de experimentación. Goia et al., (2015) utiliza un espectrofotómetro para medir transmitancia, reflectancia y absortancia del PCM para una configuración de ventana con PCM. Se hacen estas mediciones para el PCM en estado sólido y en estado líquido y para distintos grosores de vidrio y cavidad de PCM, los datos de transmitancia, absortancia y reflectancia mostrados en este artículo son de utilidad para este trabajo de titulación, ya que se incorporan al modelo desarrollado. Se muestra en la Figura 4 imágenes muy interesantes de como se ve la ventana en distintas fases del PCM.



Figura 4 Dos ejemplos de ventanas con PCM, a la izquierda se ve el PCM en estado sólido y a la derecha en estado líquido, (Goia et al., 2015).

Zhong et al., (2015), plantea un modelo de transferencia de calor en donde se ocupa las ecuaciones en diferencias parciales del calor, integrando el efecto del PCM por medio del cálculo de la entalpía del PCM, las ecuaciones utilizada para la entalpía del PCM consiste en una integral del calor específico del material más una entalpía de referencia, ecuaciones de la (5) a la (10). Los resultados obtenidos por el modelo son validados por mediciones experimentales, las cuales son características de China (lugar en donde se realizó el estudio), obteniendo resultados que muestran por ejemplo una reducción en las temperaturas de un día soleado de verano típico en China. Este artículo muestra las ecuaciones utilizadas para el modelo y muestra diagramas muy claros del problema que se plantea, se muestra a continuación en la Figura 5 un esquema de la ventana modelada con los procesos de transferencia de calor involucrados es un esquema simple y claro que se puede aplicar a lo que se realiza en este trabajo de titulación.

$$H = H_0 + \Delta H \quad (5)$$

$$H_0 = H_{ref} + \int_{t_{ref}}^t c_p dt \quad (6)$$

$$\Delta H = \beta \cdot Q_L \quad (7)$$

$$\beta = 0 \quad (t < t_{solid}) \quad (8)$$

$$\beta = \frac{t - t_{solid}}{t_{liquid} - t_{solid}} \quad (t_{solid} \leq t \leq t_{liquid}) \quad (9)$$

$$\beta = 1 \quad (t > t_{liquid}) \quad (10)$$

Donde,

H : es la entalpía específica del PCM.

H_0 : es la entalpía específica del PCM cuando inicia el cambio de fase.

ΔH : es el calor latente del PCM.

t_{ref} : es la temperatura de referencia cuando la entalpía es 0.

H_{ref} : entalpía de referencia.

t_{solid} : temperatura cuando comienza cambio de fase de sólido a líquido.

t_{liquid} : temperatura cuando PCM está en estado líquido.

Q_L : es el calor latente del PCM durante todo el proceso de cambio de fase.

β : es la fracción líquida del PCM.

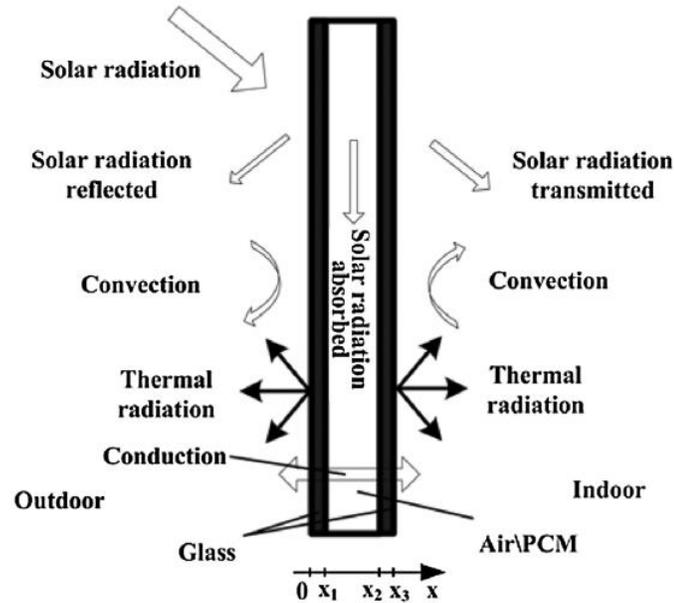


Figura 5 Esquema de modelo de ventana, (Zhong et al., 2015)

En un artículo reciente, Jin et al., (2018), hace énfasis en los métodos utilizados para integrar el efecto del PCM a la transferencia de calor. Uno de los métodos trata sobre el calor específico efectivo y el otro método trata sobre la entalpía utilizada de forma directa para modelar la transferencia de calor en sistemas con PCM, se hace la comparación al utilizar estos dos métodos para modelos numéricos y se llega a concluir que cuando el modelo se construye en base al calor específico efectivo existe un error de cálculo que es inevitable cuando el estado del PCM está cambiando de un paso de la iteración al otro, mientras que cuando se utiliza el método de la entalpía no se tiene este error, sin embargo el método por calor específico efectivo necesita menor tiempo de computo que el método de la entalpía. En este trabajo de titulación se ocupa un método más cercano al Calor Especifico Efectivo, en donde se calcula el valor del calor específico, pero se hace en base a datos de entalpía del material, por lo tanto, si bien se ocupa una ecuación principal similar a la ecuación (11), el calor específico se calcula de una forma distinta a como se muestra en la ecuación (12).

Ecuaciones método de Calor Específico Efectivo, Jin et al., (2018)

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (11)$$

$$C_p = \begin{cases} \frac{L}{2\Delta T} + \frac{C_{ps}}{2} & T < T_c - \Delta T \\ \frac{C_{ps} + C_{pl}}{2} & T_c - \Delta T \leq T \leq T_c + \Delta T \\ C_{pl} & T > T_c + \Delta T \end{cases} \quad (12)$$

Ecuaciones método de Entalpía, Jin et al., (2018)

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (13)$$

$$H = \int_{T_0}^{T_c - \Delta T} C_{ps} dT + \int_{T_c - \Delta T}^{T_c + \Delta T} C_{pc} dT + \int_{T_c + \Delta T}^T C_{pl} dT \quad (14)$$

En donde,

T : Temperatura

t : Tiempo

x : Espacio

ρ : Densidad

C_p : Calor Específico

C_{ps} : Calor Específico PCM sólido

C_{pc} : Calor Específico PCM transición

C_{pl} : Calor Específico PCM líquido

λ : Conductividad térmica

L : Calor de Fusión

T_0 : Temperatura cuando la entalpía es 0 kJ/kg.

Li et al., (2016) plantea los problemas de sobrecalentamiento que tienen los sistemas de doble panel de vidrio con PCM que en noches de verano siguen en un estado líquido lo cual indica que no hay descarga del material y por lo tanto no puede almacenar energía para el siguiente día. Se propone acá un sistema de triple panel de vidrio con una cavidad con PCM y otra con aire para evitar estos problemas. Se realizan experimentos y se analizan los resultados mostrando mejoras entre el sistema de doble panel de vidrio con PCM y el sistema de triple panel de vidrio con PCM, los cuales se muestran en la Figura 6.

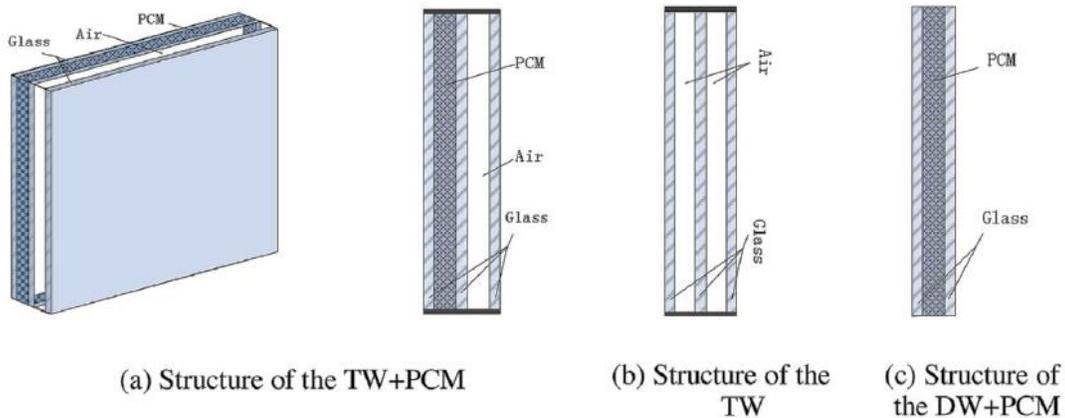


Figura 6 DW: Double Pane Window (dos paneles de vidrio con cavidad interior), TW: Triple Pane Window (tres paneles de vidrio con dos cavidades interiores), Li et al. (2016).

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Implementar modelo de transferencia de calor para ventana con materiales de cambio de fase ubicado en espacio de oficina.

3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar mediante simulaciones anuales el comportamiento térmico de ventana con PCM en espacios de oficina, para distintas temperaturas de activación del material de cambio de fase, en tres climas distintos y cuatro orientaciones de la ventana dentro del espacio de la oficina.
- Evaluar mediante simulaciones anuales el confort térmico de ventana con PCM en espacio de oficina, para distintas temperaturas de activación del material de cambio de fase, en tres climas distintos y cuatro orientaciones de la ventana dentro del espacio de la oficina.

4. Hipótesis

Integrar materiales de cambio de fase a modelo computacional de transferencia de calor para ventana de doble panel de vidrio bajo condiciones climáticas particulares de algunas localidades de Chile y otras ciudades de referencia, reducirá y desfasará los peaks de temperatura con respecto a los mismo peaks de temperatura obtenidos para un modelo sin PCM bajo las mismas condiciones climáticas, lo cual afectará de forma positiva en el confort térmico dentro del espacio de oficina, lo cual se verá reflejado en el cálculo del índice PMV.

5. Metodología de Trabajo

Se presenta esquema general de la metodología de trabajo implementada para la realización de este trabajo de titulación en la Figura 7.

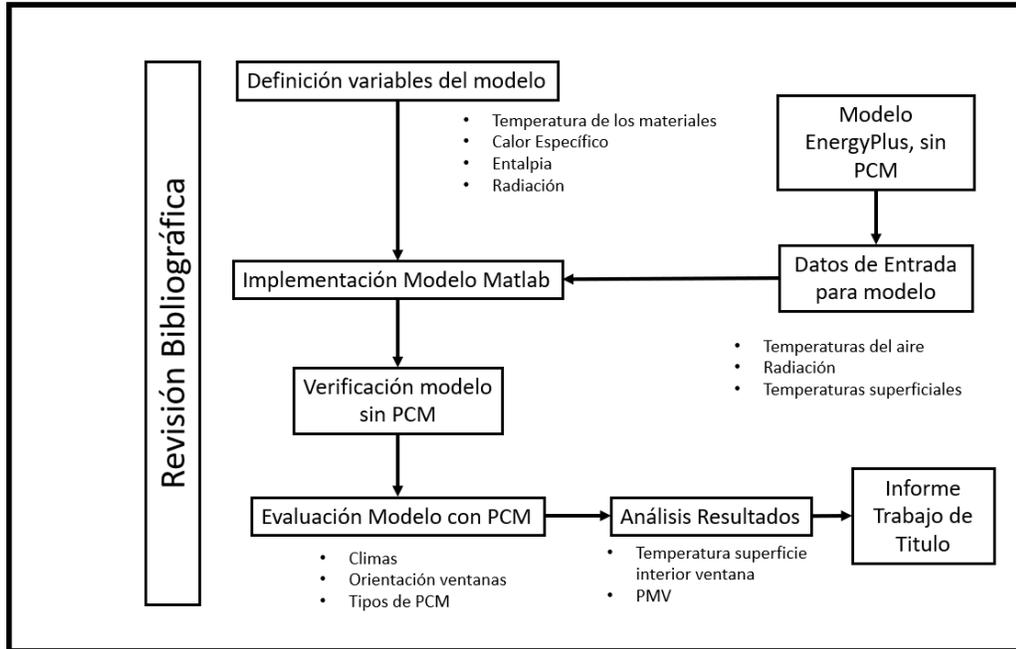


Figura 7 Esquema metodología del trabajo.

Se muestra en detalle el esquema de trabajo del modelo desarrollado, a diferencia del esquema anterior, en Figura 8 se hace solo énfasis en procesos que estén dentro de la modelación realizada

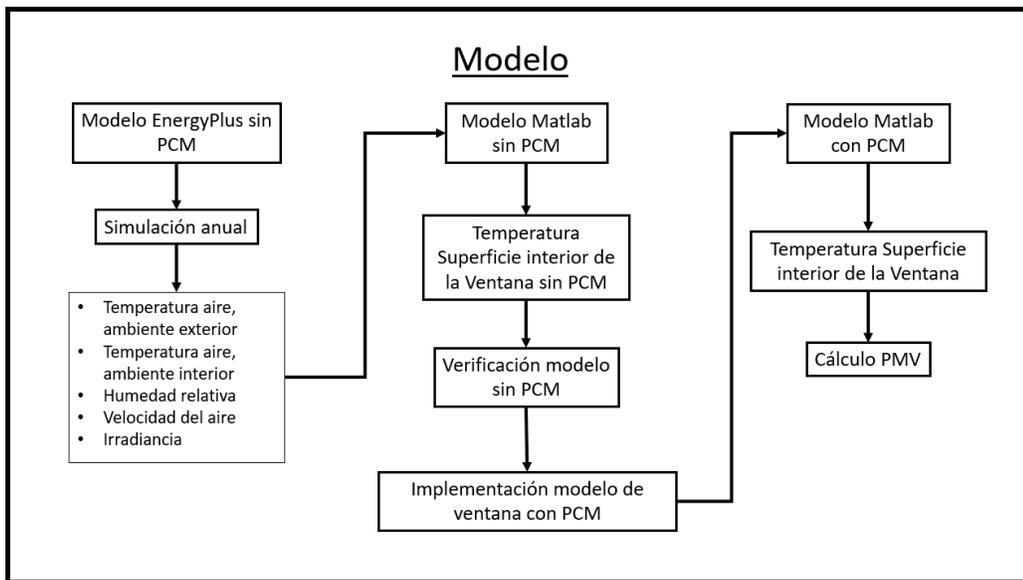


Figura 8 Esquema de modelación transferencia de calor para ventana con y sin PCM.

5.1 Oficina

La oficina que se modela consiste en un módulo de 8.0 m (ancho) x 8.0 m (fondo) x 2.7 m (alto), como se muestra en la Figura 9. El módulo de oficina tiene muros adiabáticos (Termodinámicamente hablando, un muro adiabático es aquel que no permite la transferencia de calor de un lado a otro, en este caso se suponen muros adiabáticos para solo dar importancia al proceso de transferencia de calor que ocurre en la ventana y no en los muros) y una fachada vidriada con 100% de acristalamiento. El módulo se encuentra climatizado a través de un sistema de calefacción/enfriamiento ideal que mantiene la temperatura del aire interior en un rango de 20°C y 24°C.

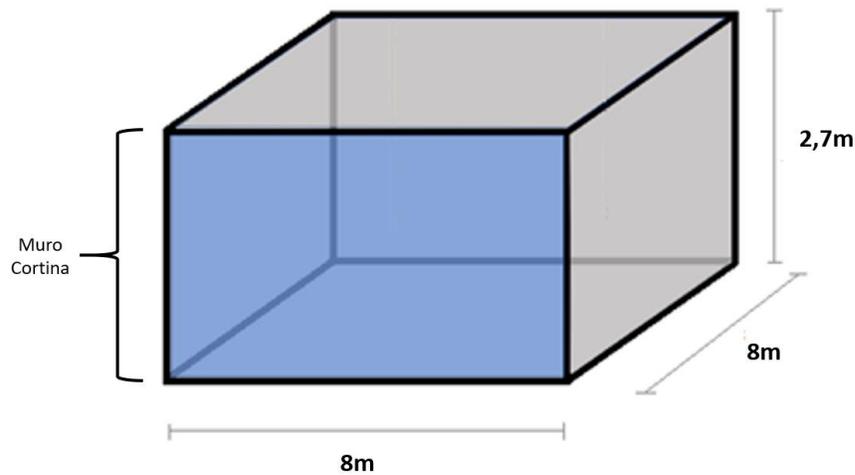


Figura 9 Geometría del espacio de oficina.

La oficina considera orientar la fachada vidriada al norte y poniente en caso de las ciudades localizadas en el hemisferio sur, y al sur y poniente en el caso de las ciudades localizadas en el hemisferio norte.

Los materiales considerados en el modelo corresponden a los elementos que componen la ventana de doble panel de vidrio, en el caso de ventana sin PCM se tienen como materiales el aire y el vidrio. Para el aire se considera una conductividad térmica $0.024 [W/m \cdot K]$, densidad $1.2 [Kg/m^3]$ y Calor Específico $1012 [J/Kg \cdot K]$. Para el vidrio se considera una conductividad térmica $0.96 [W/m \cdot K]$, densidad $2500 [Kg/m^3]$ y calor específico $840 [J/Kg \cdot K]$.

5.2 Ciudades

Las ciudades modeladas se eligieron según el tipo de clima a partir de la clasificación climática de Köppen-Geiger, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Ciudades y Climas.

Ciudad	Clima Köppe-Geiger	Latitud	Longitud
Santiago (Chile)	Bsk	-33°	-70°
Boulder (EE.UU)	Bsk	40°	-105°
Concepción (Chile)	Csb	-36°	-73°
Vancouver (Canadá)	Csb	49°	-123°
Copiapó (Chile)	BWk	-27°	-70°
El Paso (EE.UU.)	BWk	31°	-106°

El clima Bsk semiárido frío se caracteriza por tener temperatura media anual por debajo de los 18°C. El clima Csb oceánico mediterráneo se caracteriza por tener temperatura media del mes más cálido no mayor a 22°C, pero que disminuye a menos de 10°C durante cuatro o más meses al año. El clima BWk árido frío se caracteriza por tener temperatura media anual por debajo de los 18°C.

En la Tabla 2 se resumen las fechas de las semanas representativas de invierno y verano para cada ciudad incluida en el análisis.

Tabla 2: Fechas semanas representativas.

Ciudad	fecha inicio semana representativo invierno	fecha final semana representativa invierno	fecha inicio semana representativo verano	fecha final semana representativa verano
Santiago	10 de agosto	16 de agosto	8 de diciembre	14 de diciembre
Boulder	27 de enero	2 de febrero	17 de agosto	23 de agosto
Concepción	10 de agosto	16 de agosto	8 de diciembre	14 de diciembre
Vancouver	19 de marzo	25 de marzo	9 de septiembre	15 de septiembre
Copiapó	10 de agosto	16 de agosto	8 de diciembre	14 de diciembre
El Paso	6 de enero	12 de enero	20 de Julio	26 de Julio

5.3 PCMs

En este trabajo se seleccionan seis ceras de parafinas de la línea RT de la empresa Rubitherm. En la Tabla 3 se presenta la temperatura de fusión de cada parafina y el calor latente.

Tabla 3: Tipos de materiales de cambio de fase, con temperatura de fusión y calor latente respectivos.

Tipo de Material				
PCM	temperatura de fusión [K]	Calor Latente [kJ/kg]	Calor Específico mínimo [kJ/(kg K)]	Calor Específico máximo [kJ/(kg K)]
RT12	12	155	1,25	156,25
RT25	25	170		171,25
RT25HC	25	230		231,25
RT28HC	28	250		251,25
RT31	31	165		166,25
RT35	35	160		161,25

Con respecto a las propiedades más relevantes del PCM para el modelo de transferencia de calor para vidrio se considera la conductividad térmica $0.16 [W/m \cdot K]$, densidad $850 [Kg/m^3]$ y el calor específico es una variable que se calcula en cada paso de la iteración.

5.4 Modelo de transferencia de calor

Se desarrolla un modelo numérico de transferencia de calor en ventanas con PCM en Matlab. El modelo está basado en los artículos vistos previamente en la sección de Marco teórico entre los cuales destacan (Francesco Goiaa et al., 2012), (Liu et al., 2016a), (Tabares-Velasco et al., 2012), (Li et al., 2014; Zhong et al., 2015) y (Zhong et al., 2015).

El modelo utiliza el método de diferencias finitas y tiene las siguientes consideraciones (En el capítulo de modelo numérico se ven en detalle las ecuaciones utilizadas y como se complementan con los supuestos realizados):

- Cada nodo representa una capa del material y cada uno de ellos se considera homogéneo.
- La transferencia de calor se considera solo en una dirección que es perpendicular a la superficie del vidrio.
- La convección dentro del PCM (en estado líquido) no se considera.
- El vidrio y el PCM son considerados materiales termalmente homogéneos e isotrópicos, las propiedades térmicas del PCM dependen de la temperatura, mientras que las propiedades del vidrio son independientes de la temperatura.

Los datos de entrada del modelo son obtenidos del software EnergyPlus.

5.5 EnergyPlus

EnergyPlus es un software de simulación energética desarrollado por el Departamento de Energía de Estados Unidos, que ha sido validado en variados estudios. Este motor de cálculo es probablemente uno de los más avanzados actualmente. EnergyPlus integra el sistema edificio/HVAC y se encuentra disponible en forma gratuita. Este software considera la geometría, materialidad, los sistemas de control y termostatos al interior del edificio, e incluso otros factores como algoritmos de cálculo y modelos de coeficientes de convección a utilizar.

5.6 Verificación modelo sin PCM

Previo a la implementación de un modelo de transferencia de calor para ventana con PCM se verifica que el modelo que se desarrolla funciona correctamente. Como el proceso de experimentación a la fecha en que se realiza el trabajo de titulación no se ha iniciado aún, se hace necesario buscar otra forma de verificación. Se propone entonces hacer una modelación de ventana sin PCM en un software de simulación energética como EnergyPlus. Este software es una herramienta bastante útil según lo que se ha descrito con anterioridad, pero no posee integrado el análisis para materiales de cambio de fase en ventanas, por lo tanto, el propósito de esta simulación es comparar los dos modelos de ventana sin PCM (modelo de EnergyPlus y modelo desarrollado en Matlab) y verificar que los resultados sean similares. Se parte de la premisa de que, si se obtienen resultados con una diferencia aceptable para el modelo sin PCM, es de esperar que al integrar el material de cambio de fase al modelo desarrollado en Matlab se tenga una buena modelación del fenómeno de transferencia de calor.

Para verificar el modelo de transferencia de calor en ventana sin PCM se usa el Error Cuadrático Medio o RMSE (Root Mean Square Error).

Se comparan las temperaturas de la superficie interior de las ventanas sin PCM que se modelan en EnergyPlus y en Matlab. La fórmula del RMSE es la siguiente:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (x_1 - x_2)^2}{n}} \quad (15)$$

En donde,

n : cantidad de datos a evaluar

x_1 : para el caso que se trata en este trabajo corresponde a temperatura superficie interior del modelo de transferencia de calor hecho en Matlab

x_2 : para el caso que se trata en este trabajo corresponde a temperatura superficie interior del modelo de transferencia de calor hecho en EnergyPlus.

Se realiza este análisis para las seis ciudades en las que se implementa el modelo, considerando la ventana orientada en las cuatro orientaciones posibles que tiene el espacio de oficina y con datos de un año completo. Se muestra el RMSE obtenido para cada caso en la Tabla 4

Tabla 4: RMSE para datos anuales, según ciudad y orientación de ventana en espacio de oficina.

	Santiago	El Paso	Boulder	Vancouver	Concepción	Copiapó
Norte	1,24	1,21	1,01	0,72	0,96	1,16
Sur	1,14	1,39	1,16	0,78	0,88	1,05
Este	1,22	1,33	1,09	0,73	0,91	1,07
Oeste	1,26	1,31	1,07	0,79	1,05	1,27

Los valores de RMSE obtenidos varía entre 0.72 y 1.39, lo cual se considera aceptable para este trabajo y por lo tanto se implementa modelo desarrollado en Matlab con PCM incluido.

5.7 Confort Térmico

Para evaluar el confort térmico se utiliza el Voto Medio Estimado (PMV por sus siglas en inglés) de acuerdo con la norma ISO 7730, el cual permite estimar la sensación térmica global del cuerpo humano. El PMV se relaciona principalmente con el equilibrio térmico global del cuerpo. Tal equilibrio depende de la actividad física y de la vestimenta del sujeto, así como de los parámetros ambientales de temperatura del aire, temperatura media radiante, velocidad del aire y humedad del aire.

Para calcular el PMV se utilizan las siguientes formulas

$$\begin{aligned}
 PMV = & [0.303 \cdot \exp(-0.036 \cdot M) + 0.028] \\
 & \cdot \{(M - W) \cdot 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5.733 - 6.99 \cdot (M - W) - P_a] - 0.42 \\
 & \cdot [(M - W) - 58.15] - 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot (5.867 - P_a) - 0.0014 \cdot M \\
 & \cdot (34 - t_a) - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \\
 & \cdot (t_{cl} - t_a)\} \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_{cl} = & 35.7 - 0.028 \cdot (M - W) - I_{cl} \\
 & \cdot \{3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} & \text{para } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} > 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{para } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} < 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (18)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 \cdot I_{cl} & \text{para } I_{cl} \leq 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1.05 + 0.645 \cdot I_{cl} & \text{para } I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases} \quad (19)$$

Donde,

M es la tasa metabólica en vatios por metro cuadrado (W/m^2);

W es la potencia mecánica efectiva, en vatios por metro cuadrado (W/m^2);

I_{cl} es el aislamiento de la ropa, en metros cuadrados kelvin por vatio ($m^2 \cdot K/W$);

f_{cl} es el factor de superficie de la ropa;

t_a es la temperatura del aire, en grados Celsius ($^{\circ}C$);

t_r es la temperatura radiante media, en grados Celsius ($^{\circ}C$);

v_{ar} es la velocidad relativa del aire, en metros por segundos (m/s);

P_a es la presión parcial del vapor de agua, en Pascales (Pa);

h_c es el coeficiente de transmisión del calor por convección, en vatios por metro cuadrado kelvin ($W/(m^2 \cdot K)$);

t_{cl} es la temperatura de la superficie de la ropa, en grados Celsius ($^{\circ}C$);

NOTA: 1 unidad metabólica = 1 met = $58.2(W/m^2)$; 1 unidad de ropa = 1clo = $0.155(m^2 \cdot ^{\circ}C/W)$.

La Tabla 5 muestra la clasificación del índice PMV y su escala que va desde el -3 (frío) al +3 (muy caluroso).

Tabla 5: Escala de sensación térmica de siete niveles. Adaptado de norma ISO 7730.

3	Muy Caluroso
2	Caluroso
1	Ligeramente Caluroso
0+	Neutro
-1	Ligeramente Fresco
-2	Fresco
-3	Frío

5.8 Análisis de resultados:

El análisis de resultados consiste en tres etapas:

- Verificación de la capacidad del modelo de representar correctamente la transferencia de calor: Se realiza a través de gráficos de las temperaturas de las superficies interior y exterior de la ventana durante la semana representativa considerada para cada ciudad y temporada elegida con datos obtenidos del modelo desarrollado y del software EnergyPlus para el caso de la cavidad de la ventana rellena con aire.
- Análisis de temperatura interior de la ventana: Se realiza a través de los gráficos mencionados anteriormente, pero comparando para cada ciudad y semana representativa elegida las temperaturas interiores de la ventana cuando la cavidad de ella está rellena con aire o PCM. Para hacer este análisis se considera el promedio de los peaks de temperatura de cada día de la semana representativa estudiada, que puede ser una semana representativa de invierno o una semana representativa de verano. Si bien se hizo un análisis de datos anuales, los gráficos mostrados se enfocan en una semana representativa que permite ver de forma más clara el comportamiento del modelo.
- Análisis de confort térmico: Se realiza mediante el Voto Medio Estimado (PMV por sus siglas en inglés) que representa la sensación térmica del cuerpo. El análisis se lleva a cabo para cada ciudad, orientación y estación.

6. Estructura de la tesis

La estructura de esta tesis tiene tres capítulos principales, además de la Introducción, Objetivos, Hipótesis y Metodología ya presentada.

- Modelo Numérico: Se presenta el detalle de la modelación a través de las ecuaciones de transferencia de calor que gobiernan el problema, la forma de modelar el cambio de fase, las consideraciones del modelo y entradas y salidas de este.
- Resultados: Se muestran gráficos de temperatura interior de la ventana modelada, tabla de datos con resumen de los gráficos de temperatura interior de la ventana, gráficos de índice PMV y tabla resumen con los datos mostrados en gráficos de índice PMV, se incluyen casos más importantes, es decir se muestran las dos orientaciones donde se obtienen mayores temperaturas, para el caso del índice PMV se muestran gráficos solo de PCM en donde se mostró mayor mejora en el índice PMV. Se ordenan los resultados por ciudad, al final de cada ciudad se resume la información obtenida y se analiza.
- Análisis Resultados: Se analizan los resultados obtenidos, se explican las fases de carga y descarga del material en base al método del cálculo de calor específico utilizado para incorporar efecto de los materiales de cambio de fase al modelo.

7. Modelo Numérico

Como se explica en la sección Modelo de transferencia de calor en estructuras con PCM, el modelo que se desarrolla está basado en (Francesco Goiaa et al., 2012) y (Liu et al., 2016a). El modelo tiene las siguientes consideraciones:

- Cada nodo representa una capa del material y cada uno de ellos se considera homogéneo.
- La transferencia de calor se considera solo en una dirección que es perpendicular a la superficie del vidrio.
- La convección dentro del PCM (en estado líquido) no se considera.
- El vidrio y el PCM son considerados materiales termalmente homogéneos e isotrópicos, las propiedades térmicas del PCM dependen de la temperatura, mientras que las propiedades del vidrio son independientes de la temperatura.

El software elegido para desarrollar el modelo que incluirá PCM en el cálculo de la transferencia de calor es Matlab, gracias a la versatilidad de funciones que presenta este software se puede desarrollar un modelo numérico de las características deseadas. La metodología de trabajo del software desarrollado es la resolución de forma iterativa de la ecuación del calor por medio del método de Crank-Nicolson, el cual requiere de condiciones iniciales y condiciones de borde para encontrar una solución. Para desarrollar el modelo se crean subrutinas que se complementa con una rutina principal o Script principal, los que están disponibles en el Anexo de la tesis.

El modelo que se desarrolla en este trabajo de titulación incluye los fenómenos de transferencia de calor por conducción, radiación y convección, más el fenómeno de cambio de fase del material que se encuentra entre los paneles de vidrio y tiene como datos de entrada las temperaturas de los ambientes exteriores e interiores, temperaturas del aire, radiación incidente e intercambio de radiación en las superficies del vidrio que se obtienen del modelo de la oficina realizado en EnergyPlus.

7.1 Modelo

Se desarrolla la ecuación del calor:

$$\underbrace{\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{Conducción}} = k \underbrace{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}}_{\text{Radiación}} + \phi \quad (20)$$

En Donde,

- T : Temperatura [K]
- ρ : densidad [kg/m^3]
- k : Conductividad Térmica [$W/(m K)$]
- C_p : Capacidad calorífica específica [$J/(kg K)$]
- ϕ : Fuente de calor dada por la absorción de radiación solar.

Esta es una ecuación en derivadas parciales del tipo parabólica que describe la distribución del calor en una zona específica durante un periodo de tiempo, Esta ecuación se obtiene a partir de la ley de Fourier y el principio de conservación de energía, el cual afirma que la cantidad total de energía en cualquier sistema físico que no presente interacción con ningún otro sistema no varía en el tiempo, aunque es posible que esta energía se transforme (primer principio de la termodinámica).

Para resolver la ecuación (20) se emplea un método de diferencias finitas llamado método de Crank-Nicolson, el cual es un método de segundo orden en el tiempo, implícito, requiere de un paso previo (condiciones iniciales) y condiciones de borde para su cálculo, se muestra de forma esquemática en Figura 10.

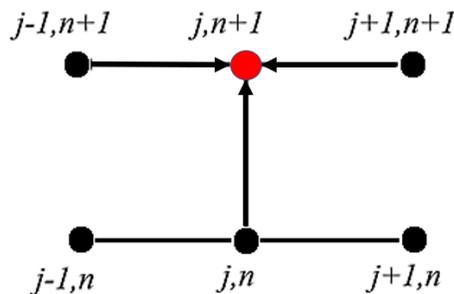


Figura 10 Esquema Método Crank-Nicolson, para calcular el punto $(j, n+1)$ se necesita información de los pasos anteriores $(j+1, n)$, (j, n) , $(j-1, n)$ y de las condiciones de borde $(j+1, n+1)$ y $(j-1, n+1)$.

Para desarrollar la ecuación (20) se considerarán las siguientes aproximaciones para las derivadas:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (21)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} \quad (22)$$

En donde,

Δt : paso de tiempo

Δx : paso espacial

T_i^n : temperatura en el instante n y en el nodo i

Estas aproximaciones se obtienen a partir de la definición de la derivada, es decir el cociente entre el incremento de una función sobre el incremento de la variable de dicha función, cuando esta última tiende a cero, en la Figura 11 se muestra de forma esquemática.

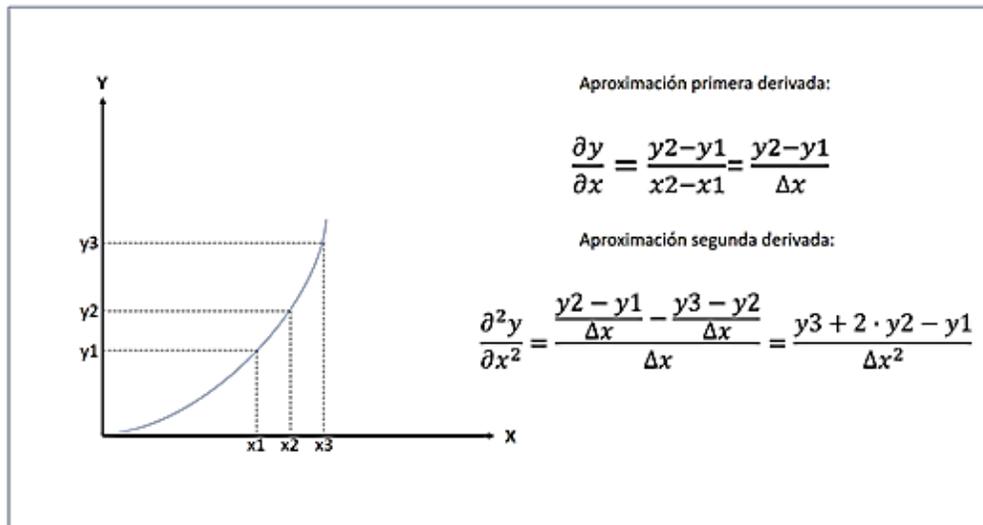


Figura 11 Esquema de cómo se consideró la derivada de la curva.

Además, se define la difusividad térmica como (se hablará en más detalle de este índice en el capítulo siguiente):

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (23)$$

Reemplazando (21), (22) y (24) en la ecuación (20) se obtiene:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \frac{\alpha}{2} \left[\frac{T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i-1}^n - 2T_i^n + T_{i+1}^n}{\Delta x^2} \right] + \frac{\phi}{\rho C_p} \quad (24)$$

La difusividad térmica es un índice que indica la velocidad a la que se produce el flujo de calor dentro de un material, es así como un material con mayor difusividad térmica alcanza el equilibrio térmico (en caso de estar desbalanceado) en un menor tiempo que otro material con menor difusividad térmica. Este índice se obtiene a partir del cociente de la conductividad térmica del material y la densidad del material multiplicado por el calor específico.

Para alivianar el algebra se definen coeficientes que ayudan a simplificar las ecuaciones de forma que sea más fácil trabajar con ellas.

$$r = \frac{\alpha \Delta t}{2 \Delta x^2} \quad (25)$$

$$\phi' = \frac{\Delta t}{\rho C_p} \phi \quad (26)$$

Con lo que finalmente se obtiene la ecuación (27):

$$T_i^{n+1} - T_i^n = r[T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1} + T_{i-1}^n - 2T_i^n + T_{i+1}^n] + \phi' \quad (27)$$

Se reordenan los términos para dejar las variables del paso n+1 a un lado de la ecuación y las variables del paso n al otro lado de la ecuación:

$$\underbrace{-rT_{i-1}^{n+1} + (1 + 2r)T_i^{n+1} - rT_{i+1}^{n+1}}_{\text{Paso de tiempo n+1}} = \underbrace{rT_{i-1}^n + (1 - 2r)T_i^n + rT_{i+1}^n}_{\text{Paso de tiempo n}} + \phi' \quad (28)$$

De forma matricial se escribe:

$$\underbrace{(I - rA)}_{\text{Vector de temperaturas, paso n+1}} \underbrace{T^{n+1}}_{\text{Vector de temperaturas, paso n+1}} = \underbrace{(I + rA)}_{\text{Vector de temperaturas, paso n}} \underbrace{T^n}_{\text{Vector de temperaturas, paso n}} + \underbrace{r(b^n + b^{n+1})}_{\text{Vector condiciones de borde}} + \underbrace{\phi'}_{\text{Vector asociado a radiación}} \quad (29)$$

Donde,

I : matriz identidad (las dimensiones de la matriz es según el espaciamiento que se ocupe para resolver el problema)

A : matriz correspondiente al sistema de ecuaciones, esta matriz representa las ecuaciones para cada nodo del modelo de muro ventana presentado anteriormente.

$$A = \begin{pmatrix} -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 \end{pmatrix} \quad (30)$$

b : vector que contiene valores residuales de las condiciones de borde, la obtención de este vector se explicara más adelante.

$$b = \begin{pmatrix} q1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ q2 \end{pmatrix} \quad (31)$$

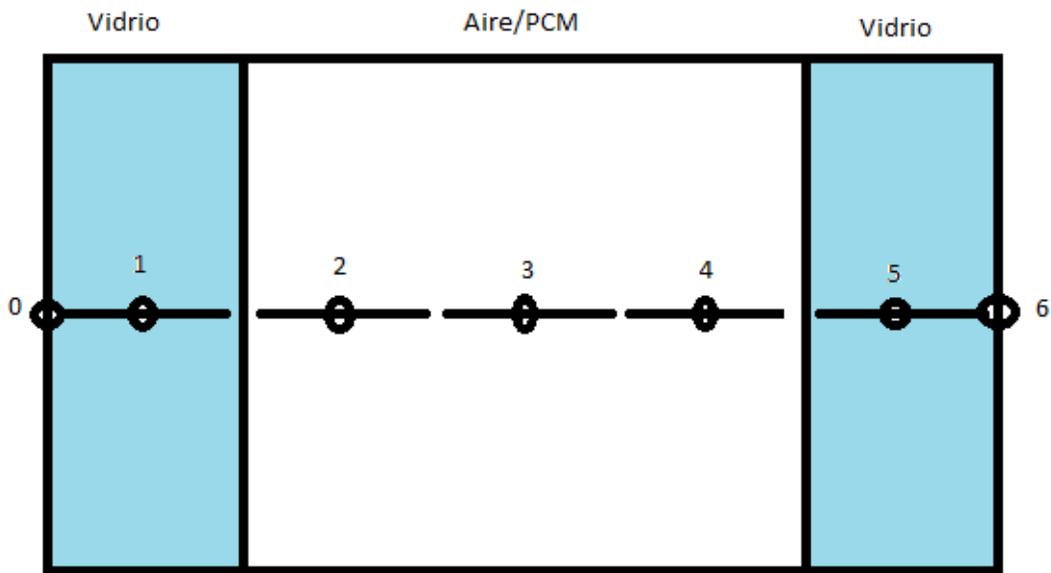


Figura 12 Representación de la distribución de los nodos en el modelo de muro ventana.

La Figura 12 muestra cómo se divide en 5 nodos internos (1, 2, 3, 4 y 5) y dos superficiales (0 y 6), los nodos 1 y 5 corresponde a vidrio y los nodos 2, 3 y 4 corresponden a PCM o Aire.

El modelo desarrollado calcula las temperaturas en los nodos superficiales a partir de un perfil de temperaturas de los nodos mostrados, pero para un paso anterior de tiempo al del cálculo actual. Además, se utilizan las condiciones de borde en la superficies externa e interna, las cuales consideran el intercambio de radiación entre las superficies de los vidrios y los ambientes y las temperaturas ambientales a las que están expuestas las superficies del muro ventana.

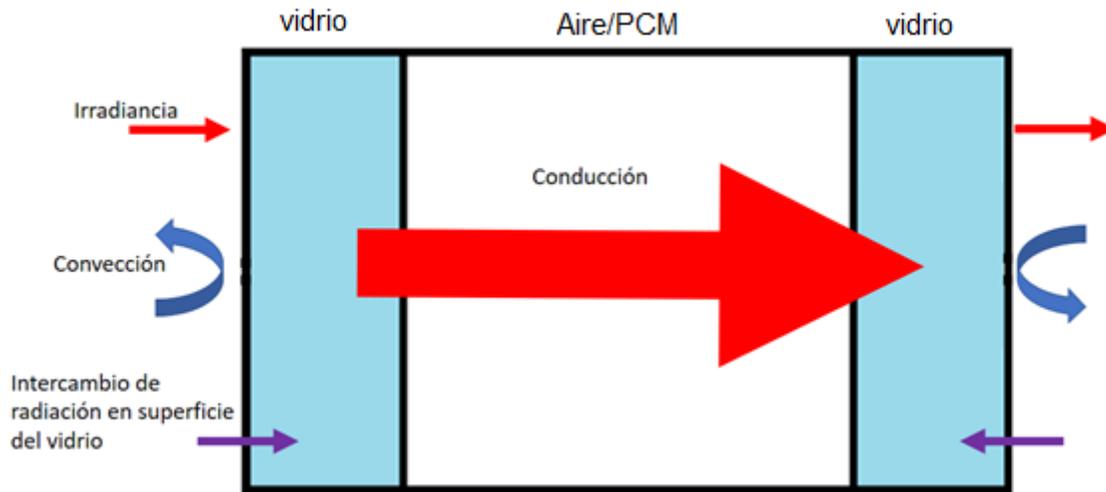


Figura 13 Esquema de los mecanismos de transferencia de calor considerados para el desarrollo del modelo.

La Figura 13 muestra el modelo desarrollado con los fenómenos de transferencia de calor que ocurren en la superficie del muro ventana y los traduce en transferencia de calor por conducción a través del muro ventana.

Se establecen condiciones de borde que consideran la interacción de las superficies externas del muro ventanas, es decir la superficie del muro ventana que da hacia el exterior de la habitación y la superficie del muro ventana que da hacia el interior de la habitación. Estas condiciones de borde se ven influenciadas por la convección de la capa superficial de aire que hay en el muro ventana y el intercambio de radiación que se produce entre las superficies y los medios exteriores o interiores según corresponda, en las ecuaciones que se muestran a continuación se hace la distinción de cada componente.

Las condiciones de borde son del tipo Neumann (o también llamado condición de frontera de segundo orden), dado que se está trabajando con la derivada de la variable que se busca calcular por medio de diferencias finitas, esta condición de borde de tipo Neumann expresa el flujo de calor que pasa a través de la superficie según la radiación y la convección que ocurre en esta zona.

Utilizando las parametrizaciones de las derivadas desarrolladas anteriormente se logra obtener las ecuaciones necesarias para completar el sistema de ecuaciones que resuelve el sistema de transferencia de calor en el muro ventana de forma completa. Las ecuaciones encontradas gracias a las condiciones de borde modifican la matriz A que se mostró anteriormente en la primera y en la última fila de la ecuación (30), ya que estas filas están relacionadas con las ecuaciones de transferencia de calor que ocurre en las superficies de la ventana.

Para $x=0$, borde externo

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = \underbrace{q_{rad}}_{\text{Componente de radiación}} + \underbrace{h_{out}(T_{a,out} - T_{out})}_{\text{Componente de convección}} \quad (32)$$

Donde,

q_{rad} : radiación de intercambio entre superficie exterior y medio exterior

h_{out} : coeficiente de convección exterior

T_{out} : temperatura en superficie exterior, también se representará por T_0 (temperatura en el nodo 0)

$T_{a,out}$: temperatura del aire en el medio exterior

La radiación de intercambio se define como:

$$q_{rad} = \underbrace{hr_{sky}(T_s - T_0)}_{\text{Radiación difusa cielo}} + \underbrace{hr_{air}(T_a - T_0)}_{\text{Radiación difusa aire}} + \underbrace{hr_{grnd}(T_a - T_0)}_{\text{Radiación difusa suelo}} \quad (33)$$

Donde,

hr_{sky} : coeficiente de radiación difusa del cielo.

hr_{air} : coeficiente de radiación difusa del aire.

hr_{grnd} : coeficiente de radiación difusa del suelo.

Aproximando la derivada como se mostró anteriormente en ecuaciones (14) y (15) se obtiene:

$$-k \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} = hr_{sky}(T_s - T_0) + (hr_{air} + hr_{grnd})(T_a - T_0) + h_{out}(T_a - T_0) \quad (34)$$

Luego si se despeja T_0 :

$$T_0 = \frac{1}{1 + (hr_{sky} + hr_{air} + hr_{grnd} + h_{out})\Delta x/k} T_1 + q1 \quad (35)$$

Donde q1 hace referencia al elemento previamente mostrado en el vector b y se define como:

$$q1 = \left(\frac{T_s hr_{sky} + (hr_{air} + hr_{grnd} + h_{out})T_a}{\frac{k}{\Delta x} + (hr_{sky} + hr_{air} + hr_{grnd} + h_{out})} \right) \quad (36)$$

Recordando la ecuación (28) evaluada en i=1, se obtiene:

$$-rT_0^{n+1} + (1 + 2r)T_1^{n+1} - rT_2^{n+1} = rT_0^n + (1 - 2r)T_1^n + rT_2^n + \phi' \quad (37)$$

Reemplazando el valor de (35) en (37), se obtiene:

$$\begin{aligned} -r \left(\frac{1}{1 + (hr_{sky} + hr_{air} + hr_{grnd} + h_{out})\Delta x/k} T_1^{n+1} + q1^{n+1} \right) + (1 + 2r)T_1^{n+1} - rT_2^{n+1} \\ = r \left(\frac{1}{1 + (hr_{sky} + hr_{air} + hr_{grnd} + h_{out})\Delta x/k} T_1^n + q1^n \right) + (1 - 2r)T_1^n + rT_2^n + \phi' \end{aligned} \quad (38)$$

Reordenando términos, se obtiene:

$$\begin{aligned} \left(1 + 2r - \frac{r}{1 + (hr_{sky} + hr_{air} + hr_{grnd} + h_{out})\Delta x/k} \right) T_1^{n+1} - rT_2^{n+1} - r q1^{n+1} \\ = \left(1 - 2r + \frac{r}{1 + (hr_{sky} + hr_{air} + hr_{grnd} + h_{out})\Delta x/k} \right) T_1^n + rT_2^n + r q1^n + \phi' \end{aligned} \quad (39)$$

Para $x=L$, borde interno

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = \epsilon \sigma (T_{in}^4 - T_{a,in}^4) + h_{in} (T_{in} - T_{a,in}) \quad (40)$$

Donde,

ϵ : emisividad

σ : constante Stefan Boltzmann

h_{in} : coeficiente de convección interior

T_{in} : temperatura en superficie interior, también se representará por T_6 (temperatura en el nodo 6)

$T_{a,in}$: temperatura del aire en el medio interior

Aproximando la derivada se obtiene:

$$-k \frac{T_6 - T_5}{\Delta x} = \epsilon \sigma (T_6^4 - T_{a,in}^4) + h_{in} (T_6 - T_{a,in}) \quad (41)$$

7.1.1 Problema de linealidad

La ecuación (41) es una ecuación no lineal, lo cual representa una dificultad para la resolución del problema que se está resolviendo. Para mantener la linealidad del problema se define una variable auxiliar ci

$$ci = \epsilon \sigma T_6^3 \quad (42)$$

La idea de usar esta variable auxiliar es mantener la linealidad del problema, de forma que la incógnita T_6 que estaba elevada a la cuarta potencia quedé simplemente elevada a 1, pero acompañado de una variable dependiente de T_6 que se recalcula en iteraciones sucesivas hasta lograr que la variación de T_6 calculada entre la iteración actual y la iteración anterior no sea mayor a cierto valor aceptable igual a 0.1.

Luego, dado que el problema no lineal se pasó a un problema lineal, se despeja T_6 :

$$T_6 = \frac{k}{k + h_{out}\Delta x + ci\Delta x} T_5 + q2 \quad (43)$$

Donde q2 hace referencia al elemento previamente mostrado en el vector b y se define como:

$$q2 = (\epsilon\sigma T_{a,in}^4 - h_{in}T_{a,in}) \frac{1}{\frac{k}{\Delta x} + ci + h_{in}} \quad (44)$$

Recordando la ecuación (28) evaluada en i=5, se obtiene

$$-rT_4^{n+1} + (1 + 2r)T_5^{n+1} - rT_6^{n+1} = rT_4^n + (1 - 2r)T_5^n + rT_6^n + \phi' \quad (45)$$

Reemplazando el valor de (43) en (45), se obtiene:

$$\begin{aligned} -rT_4^{n+1} + (1 + 2r)T_5^{n+1} - r \left(\frac{k}{k + h_{out}\Delta x + ci\Delta x} T_5^{n+1} + q2^{n+1} \right) \\ = rT_4^n + (1 - 2r)T_5^n + r \left(\frac{k}{k + h_{out}\Delta x + ci\Delta x} T_5^n + q2^n \right) + \phi' \end{aligned} \quad (46)$$

Reordenando términos

$$\begin{aligned} -rT_4^{n+1} + \left(1 + 2r - \frac{rk}{k + h_{out}\Delta x + ci\Delta x} \right) T_5^{n+1} - rq2^{n+1} \\ = rT_4^n + \left(1 - 2r + \frac{rk}{k + h_{out}\Delta x + ci\Delta x} \right) T_5^n + rq2^n + \phi' \end{aligned} \quad (47)$$

Con las ecuaciones (39) y (47) se puede modificar la matriz A para incluir el efecto de las condiciones de borde en el sistema de transferencia de calor, como se explicó con anterioridad se modifican la primera y última fila de la matriz A, dado que estas están relacionadas a las superficies exterior e interior del muro ventana.

$$A = \begin{pmatrix} \left(-2 + \frac{k}{k + (hr_{sky} + hr_{air} + hr_{grnd} + h_{out})\Delta x}\right) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \left(-2 + \frac{k}{k + ci\Delta x + h_{in}\Delta x}\right) & 0 \end{pmatrix} \quad (48)$$

7.2 Cambio de Fase

Es a través del calor específico que se incorpora el efecto característico de los materiales de cambio de fase al modelo de muro ventana. Este efecto se basa en un cambio significativo en el valor del calor específico al pasar por un cambio de fase del material, por ejemplo, el paso de estado sólido a estado líquido.

El calor específico se define como la cantidad de calor necesaria para que una unidad de masa de una determinada sustancia eleve su temperatura en una unidad (Serway, 2015). En base a esta propiedad del material se sustenta el uso de materiales de cambio de fase, ya que materiales con un alto calor latente, como es el caso de los PCM usados para este trabajo de titulación, tienen una mayor capacidad de almacenar energía.

Volviendo a la ecuación del calor podemos reescribirla para reunir las propiedades del material en un índice que es relevante en este análisis:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \phi / \rho C_p \quad (49)$$

En donde se define $\alpha = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ como la difusividad térmica del material, este índice expresa la velocidad a la que ocurre el cambio de temperatura o transferencia de calor en un material, hasta que este alcanza el equilibrio térmico (Guillory, 2009).

El cálculo del calor latente en el modelo desarrollado se basa en lo hecho por (Tabares-Velasco et al., 2012), en donde se usaron datos de entalpía para el cálculo. El calor latente que se calcula para el paso i de la iteración se calcula en base a los datos de los pasos previos:

$$Cp_i = \frac{h_{i-1} - h_{i-2}}{t_{i-1} - t_{i-2}} \quad (50)$$

En donde,

h_i : entalpía en el paso i

t_i : temperatura en el paso i .

La Figura 14 muestra un gráfico representativo de entalpía vs temperatura para PCM usados en este trabajo, la cual es típica para este tipo de materiales. Durante el cambio de fase, la variación

de entalpía es mayor. Esto provoca que el valor del calor específico sea mayor en esta parte de la curva, y en consecuencia se tiene una menor difusividad térmica. Todo esto causa que la temperatura calculada para los siguientes pasos de la iteración varíe menos con respecto al valor anterior y por lo tanto se produzca el efecto de reducción y desfase en los peaks de temperatura respecto al modelo que tiene como relleno aire.

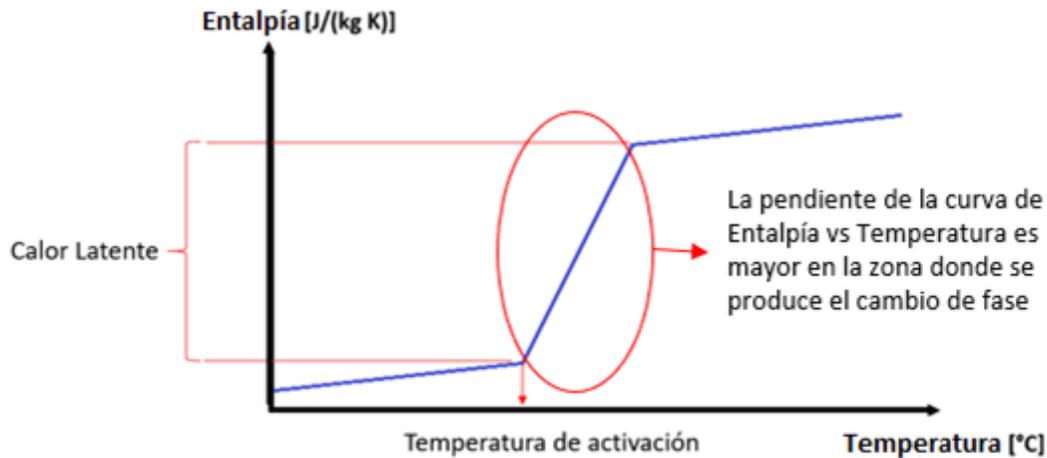


Figura 14 Curva Entalpía vs Temperatura típica para PCM

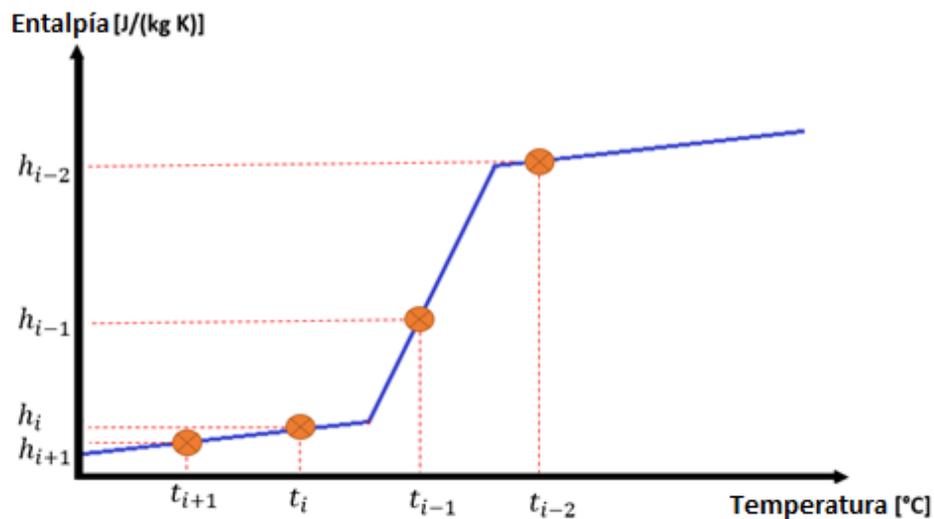


Figura 15 Curva Entalpía vs Temperatura, para distintos puntos de la curva.

Para los resultados que se muestran en el capítulo de Resultados se tendrá que en algunos días se producirá la descarga y en otros no, a pesar de que la temperatura descende por bajo la temperatura de activación en el modelo de la ventana rellena con aire. Al analizar la fórmula del calor específico, ecuación (50) para una iteración "i" se necesita tomar los datos de las dos iteraciones anteriores. Luego, de la iteración "i-2" a la iteración "i-1", las temperaturas descienden, sin embargo, la diferencia de entalpía sigue siendo considerable, el calor específico

que se calcula seguirá teniendo un alto valor, esto implica que la difusividad térmica del material sigue siendo baja y por lo tanto la variación de temperatura sigue siendo baja. Posteriormente, en el siguiente paso de la iteración “i+1” se ve que la temperatura t_i necesaria para calcular el Cp_{i+1} está por debajo de la temperatura de activación del material (en donde cambia de pendiente la curva de entalpía) y aun así se mantiene una considerable diferencia de entalpía, por último, si se avanza un paso más en la iteración vemos que recién para las temperaturas t_i y t_{i+1} se obtiene una diferencia de entalpía baja y por lo tanto la difusividad térmica será menor, produciéndose así una mayor variación en las temperaturas.

Por otra parte, en los resultados se verá que algunos materiales bajo ciertas condiciones se asemejan a resultados del modelo sin PCM, esto se debe a que las temperaturas altas causan que el calor específico sea calculado en una zona de la curva de entalpía en donde la pendiente es muy baja, por lo que la diferencia de entalpía entre un paso y el anterior también es baja, en consecuencia, el calor específico será bajo y la difusividad térmica alta. La temperatura calculada en el siguiente paso de tiempo variara más debido a las condiciones del problema.

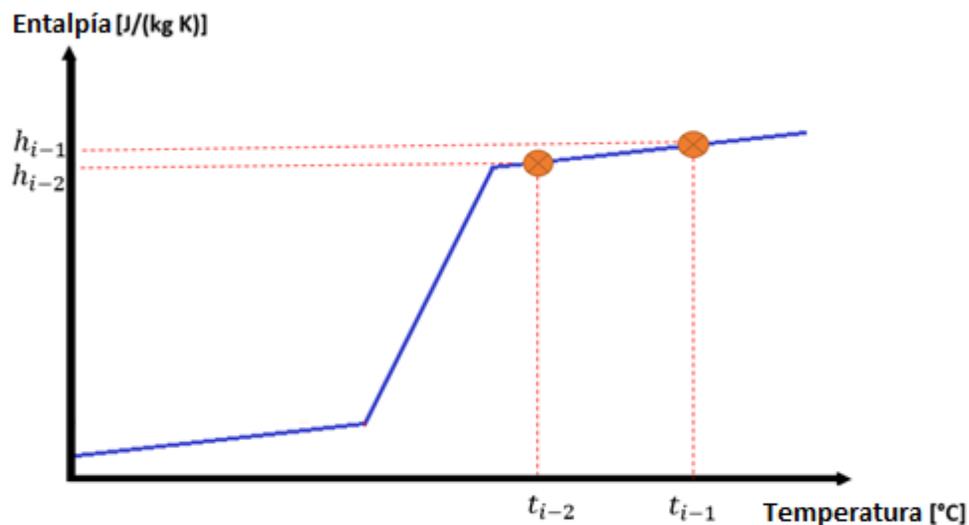


Figura 16 Grafico Entalpía vs Temperatura para material con altas temperaturas.

8. Resultados

8.1 Temperatura de la superficie interior de la ventana

A continuación, se presentan resultados obtenidos del modelo de transferencia de calor desarrollado para una ventana ubicada en un módulo de oficina. Se presentan los siguientes casos:

- Tipos de PCM en la cavidad de la ventana, según su temperatura de activación y calor latente (Tabla 3).
- Climas
- Orientaciones

Se presentan resultados por ciudad, los cuales incluyen:

- Gráficos de temperatura de superficie interior de la ventana, en donde se muestran los resultados para semanas representativas del año (invierno y verano) y se comparan los tipos de PCM mencionados anteriormente con modelo de ventana sin PCM.
- Tablas donde se presentan los valores promedios de las máximas temperaturas superficiales del muro ventana por día para las semanas representativas de verano e invierno. Para ayudar en el análisis se agregan colores a los datos, el color rojo indica un aumento de temperatura al cambiar de un relleno de aire a un relleno con PCM, el color amarillo representa una disminución de entre 0°C y 2°C al cambiar de relleno de aire a relleno de PCM, el color azul representa una disminución de entre 2°C y 4°C al cambiar de relleno de aire a relleno de PCM y el color verde representa una disminución de más de 4°C al cambiar de relleno de aire a relleno de PCM.
- Gráficos del índice PMV para el PCM con mayor reducción en el índice PMV e índice PMV del mismo caso, pero con el modelo sin PCM.
- Tablas resumen con los datos de PMV, se muestran resultados de los promedios de los peaks de PMV para los distintos casos analizados durante la semana representativa. Se incorporan colores a los datos para facilitar el análisis, el color rojo indica que el PMV se encuentra entre valores 2 (Caluroso) y 1 (Ligeramente caluroso), el color rosado indica que el valor del PMV se encuentra entre 1 y 0 (neutro), el color celeste indica que el valor del PMV se encuentra entre el valor 0 y -1 (ligeramente frío), estos valores vienen dados por la Tabla 5 de niveles de sensación térmica.
- Resumen de datos más significativos, por cada caso.

En el capítulo siguiente se hace un análisis de los resultados obtenidos, basando en el fenómeno descrito en el capítulo de Cambio de Fase.

8.1.1 Santiago, Temperatura superficie interior ventana

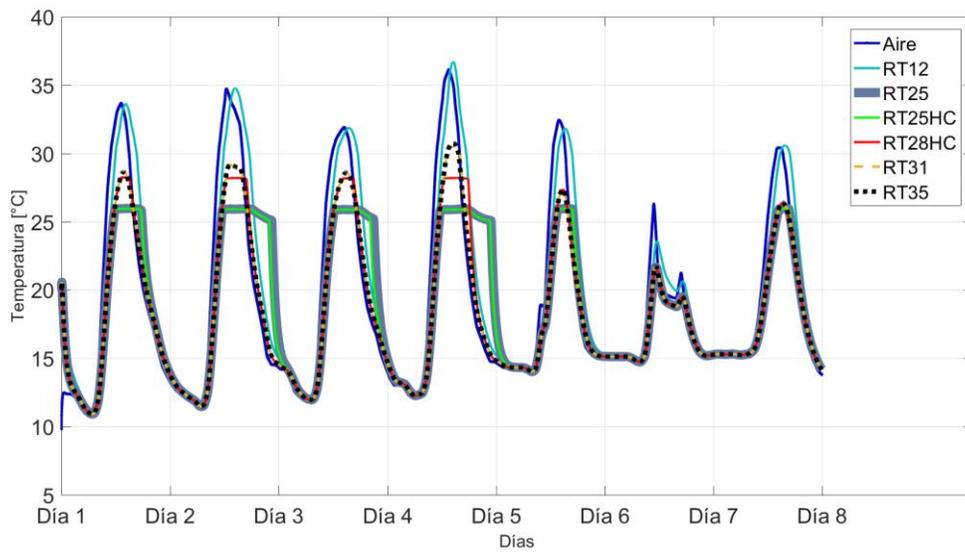


Figura 17 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Santiago. Orientación ventana: Norte. Semana representativa invierno.

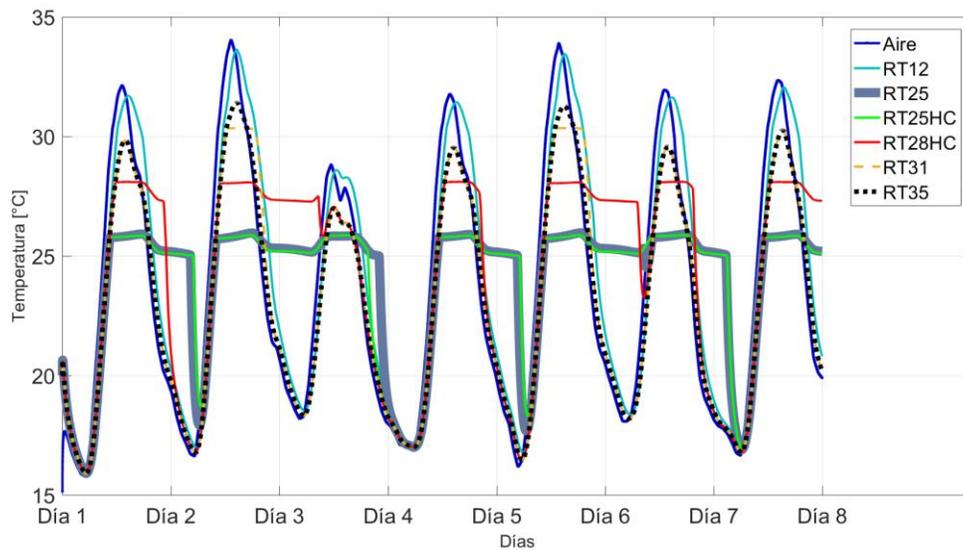


Figura 18 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Santiago. Orientación ventana: Norte. Semana representativa verano.

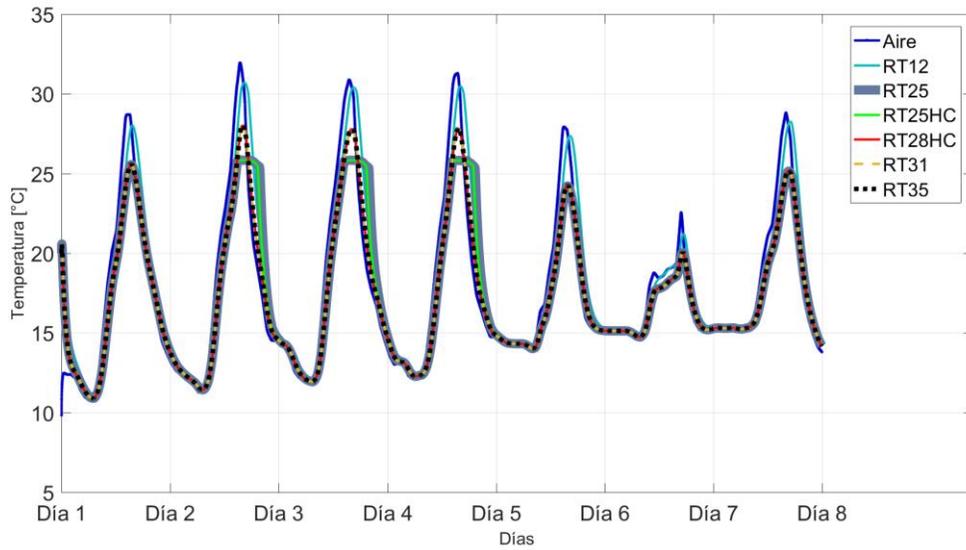


Figura 19 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Santiago. Orientación ventana: Poniente. Semana representativa invierno.

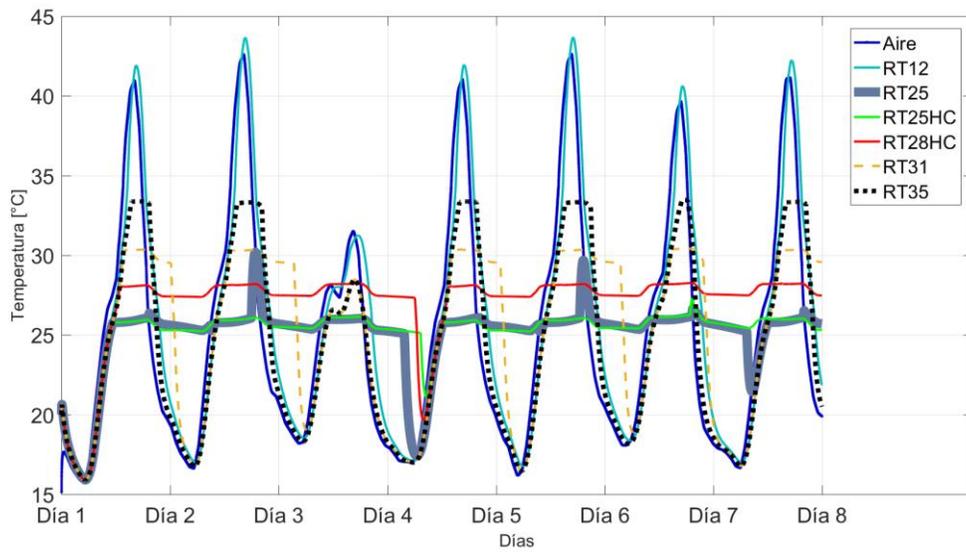


Figura 20 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Santiago. Orientación ventana: Poniente. Semana representativa verano.

Tabla 6: Temperaturas superficie interior muro ventana, Santiago, orientaciones de ventana Norte y Poniente

Material/Ciudad/Orientación	Aire Semana Invierno [°C]	PCM Semana Invierno [°C]	Aire Semana Verano [°C]	PCM Semana Verano [°C]
RT12 Santiago norte	32,2	30,4	32,1	31,1
RT12 Santiago poniente	28,9	27,0	39,9	40,4
RT25 Santiago norte	32,2	25,2	32,1	25,8
RT25 Santiago poniente	28,9	24,4	39,9	25,9
RT25hc Santiago norte	32,2	25,2	32,1	25,8
RT25hc Santiago poniente	28,9	24,4	39,9	26,0
RT28hc Santiago norte	32,2	26,7	32,1	27,9
RT28hc Santiago poniente	28,9	25,2	39,9	28,1
RT31 Santiago norte	32,2	27,1	32,1	29,4
RT31 Santiago poniente	28,9	25,2	39,9	30,1
RT35 Santiago norte	32,2	27,1	32,1	29,6
RT35 Santiago poniente	28,9	25,2	39,9	32,6

De la Figura 17 a la Figura 20 se puede apreciar de forma visual el comportamiento de los PCM, con sus fases de carga y descarga. Para las semanas de invierno y verano el RT12 no produce la descarga del material ya que las temperaturas resultantes están siempre por sobre la temperatura de activación, al no producirse el cambio de fase para el RT12, este material no presenta capacidad de almacenamiento de energía y por lo tanto entrega valores similares a los que da el modelo sin PCM.

Para temperaturas bajas todos los materiales se comportan de igual forma en el modelo, ya que a temperaturas bajas (bajo 15°C aproximadamente) las propiedades de los materiales son similares.

De la Tabla 6 es posible verificar que para las semanas de invierno los PCM que reducen en mayor cantidad los promedios de los peaks de temperatura en la semana son el RT25 y RT25HC, reduciendo en 7°C el promedio (de 32°C a 25°C).

Para las semanas de verano se obtiene que el RT25 y RT25hc son los PCM que más reducción del promedio de peaks de la semana generan, se reduce el promedio en 14°C (de 40°C a 26°C). Además se puede ver que para las semanas de verano hay días en donde no se produce la descarga de algunos de los PCM (sin contar con el RT12 que no se activa en ningún momento), específicamente en verano para la ventana orientada hacia el norte, en los días 3 y 6 no se produce descarga del RT25 y RT25hc, mientras que para la semana de verano con la ventana orientada hacia el poniente no se produce la descarga del RT25, RT25hc y RT28hc en todos los días de la semana a excepción del día 4.

8.1.2 Santiago, PMV

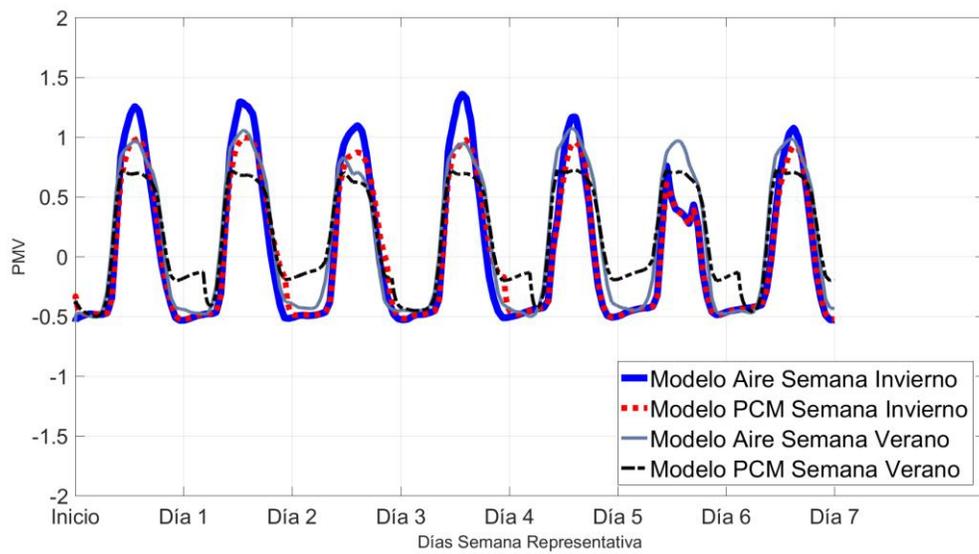


Figura 21 RT25, Santiago, norte.

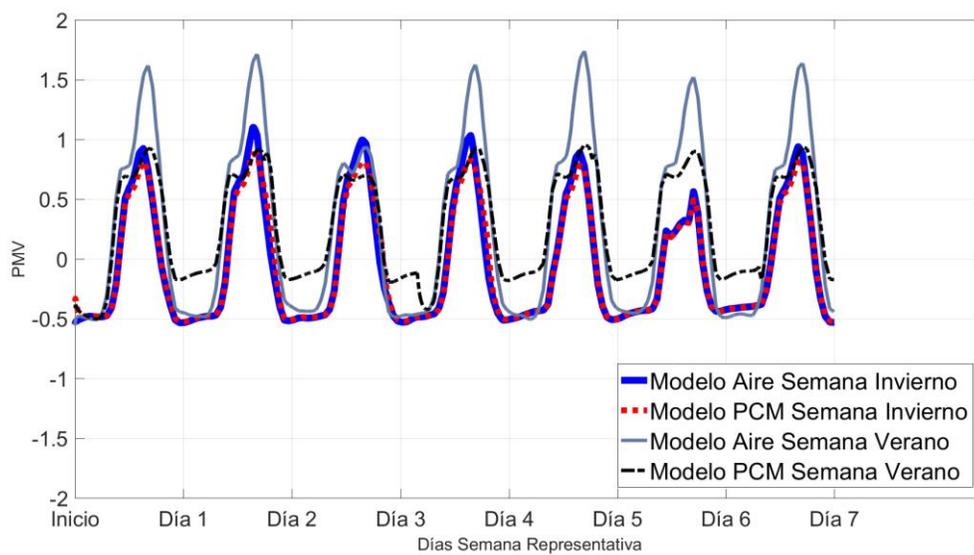


Figura 22 RT25, Santiago, Poniente.

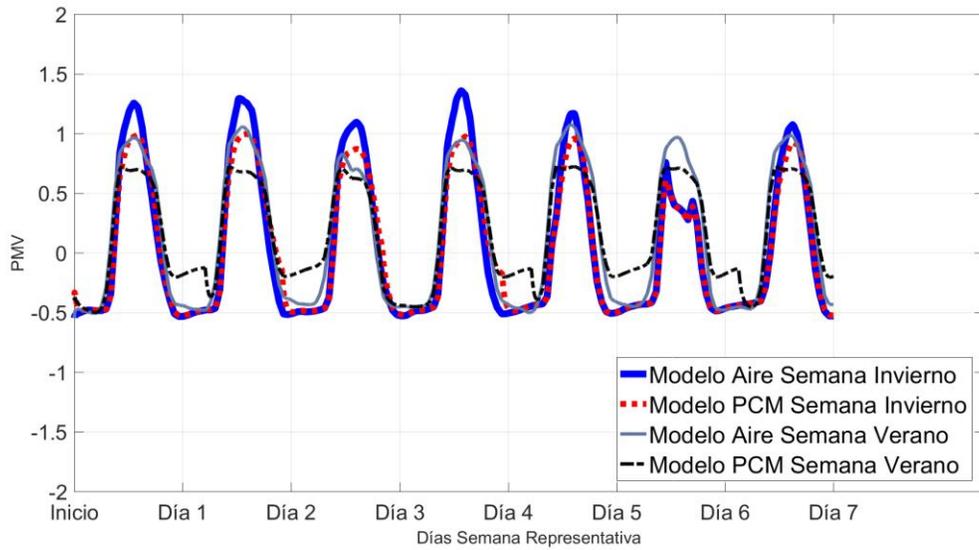


Figura 23 RT25hc, Santiago, norte.

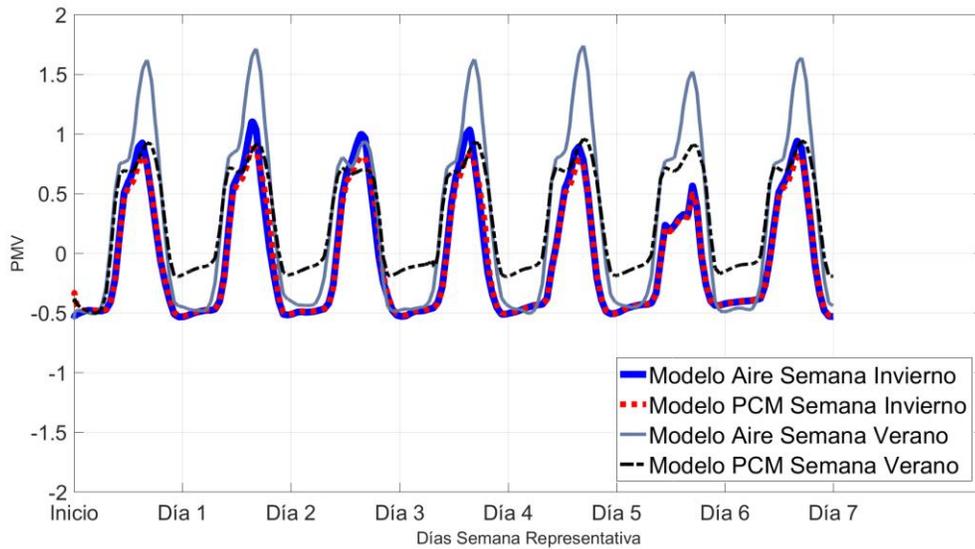


Figura 24 RT25hc, Santiago, poniente.

Tabla 7: Índices PMV, Santiago, orientaciones de ventana norte y poniente

Material/Ciudad/Orientación	Aire Semana Invierno	PCM Semana Invierno	Aire Semana Verano	PCM Semana Verano
RT12 Santiago norte	1,14	1,08	0,98	0,92
RT12 Santiago poniente	0,93	0,87	1,54	1,57
RT25 Santiago norte	1,14	0,89	0,98	0,70
RT25 Santiago poniente	0,93	0,78	1,54	0,89
RT25hc Santiago norte	1,14	0,89	0,98	0,70
RT25hc Santiago poniente	0,93	0,78	1,54	0,90
RT28hc Santiago norte	1,14	0,94	0,98	0,78
RT28hc Santiago poniente	0,93	0,81	1,54	0,96
RT31 Santiago norte	1,14	0,95	0,98	0,84
RT31 Santiago poniente	0,93	0,81	1,54	1,03
RT35 Santiago norte	1,14	0,95	0,98	0,85
RT35 Santiago poniente	0,93	0,81	1,54	1,14

En cuanto al PMV, para la semana de invierno los PCM con mejor rendimiento son el RT25 y RT25hc que en comparación al modelo con aire pasan de un PMV de 1,1 a 0,9.

Para la semana de verano se muestra un mejor rendimiento en el RT25 y RT25hc, se pasa de un PMV 1,5 en el modelo con aire a un PMV igual a 0,9 para el modelo con PCM.

De la Figura 21 a la Figura 24 se puede apreciar que al aplicar el PCM el PMV pasa de estar en un rango de Caluroso-Ligeramente Caluroso a un rango de Ligeramente Caluroso-Neutro.

9.2.1 Concepción, Temperatura superficie interior ventana

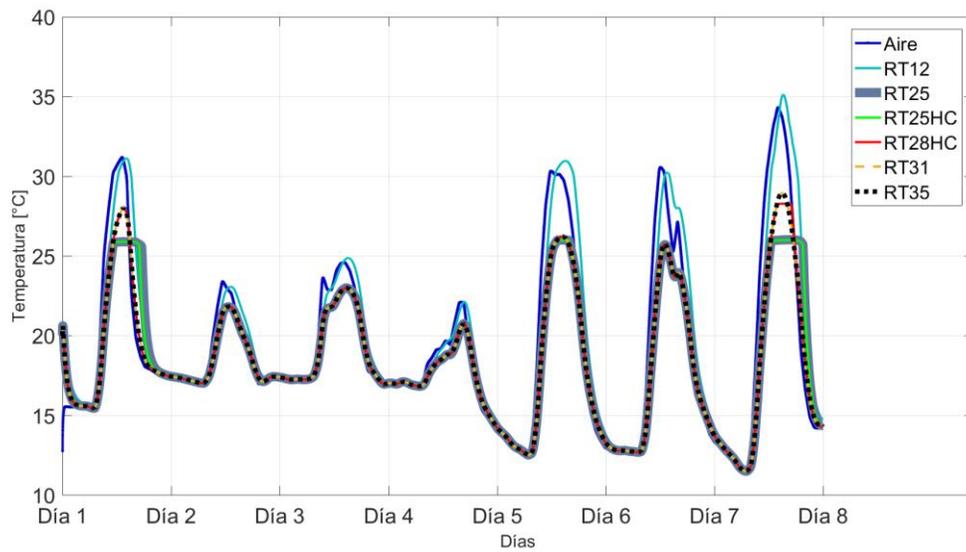


Figura 25 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Concepción. Orientación ventana: Norte. Semana representativa invierno.

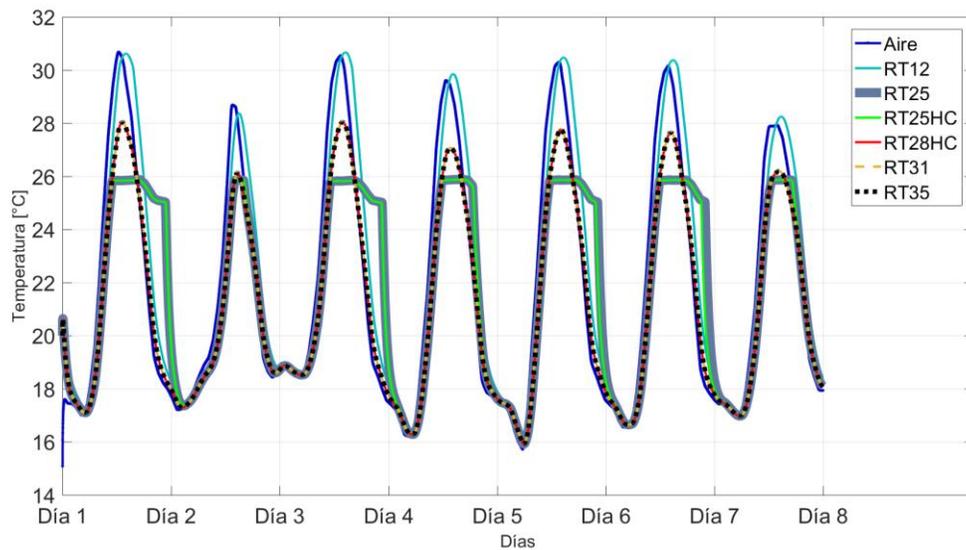


Figura 26 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Concepción. Orientación ventana: Norte. Semana representativa verano.

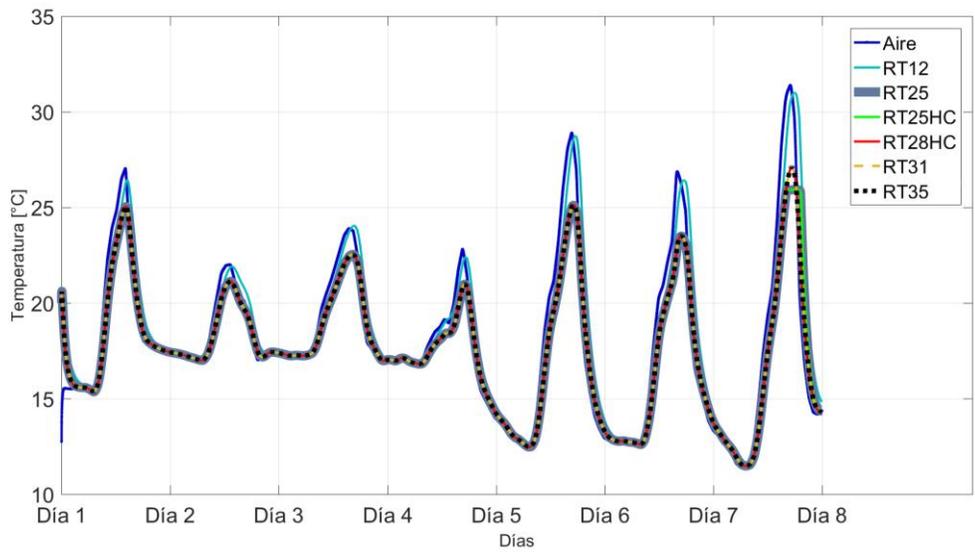


Figura 27 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Concepción. Orientación ventana: Poniente. Semana representativa invierno.

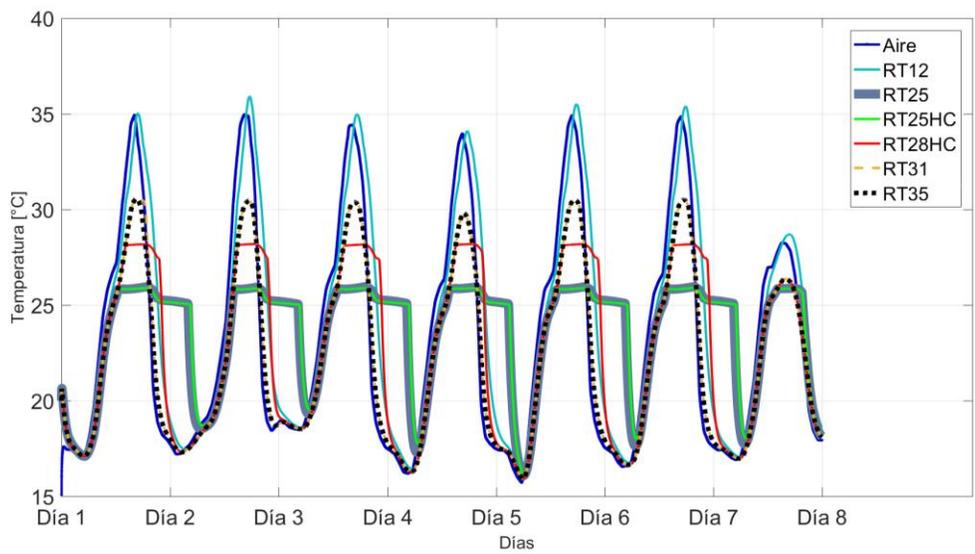


Figura 28 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Concepción. Orientación ventana: Poniente. Semana representativa verano.

Tabla 8: Temperaturas superficie interior muro ventana, Concepción, orientaciones de ventana Norte y Poniente

Material/Ciudad/Orientación	Aire Semana Invierno [°C]	PCM Semana Invierno [°C]	Aire Semana Verano [°C]	PCM Semana Verano [°C]
RT12 Concepción norte	29,7	29,1	29,7	29,2
RT12 Concepción poniente	26,1	25,3	33,7	33,0
RT25 Concepción norte	29,7	24,9	29,7	25,8
RT25 Concepción poniente	26,1	23,3	33,7	25,9
RT25hc Concepción norte	29,7	24,9	29,7	25,8
RT25hc Concepción poniente	26,1	23,3	33,7	25,8
RT28hc Concepción norte	29,7	25,6	29,7	27,0
RT28hc Concepción poniente	26,1	23,5	33,7	27,9
RT31 Concepción norte	29,7	25,6	29,7	27,0
RT31 Concepción poniente	26,1	23,5	33,7	29,7
RT35 Concepción norte	29,7	25,6	29,7	27,0
RT35 Concepción poniente	26,1	23,5	33,7	29,7

De la Figura 25 a la Figura 28 se puede apreciar de forma visual el comportamiento de los PCM, con sus fases de carga y descarga. Como se vio en el caso de Santiago, el RT12 no llega al cambio de fase, por lo tanto, el material no es capaz de reducir las temperaturas en comparación a los resultados mostrados por el modelo sin PCM.

Para el caso de Concepción se ve que se produce la descarga de los PCM (a excepción del RT12) para todos los días de las semanas representativas de invierno y verano, para la ventana orientada hacia el norte o hacia el poniente.

De la Tabla 8 es posible verificar que para la semana de invierno los PCM que reducen más los promedios de peaks de temperatura en la semana son el RT25 y RT25hc, reduciendo en 4,8°C el promedio (de 29,7°C a 24,9°C).

Para la semana de verano se obtiene que el RT25 y RT25hc son los PCM que más reducción del promedio de peaks de la semana generan, se reduce el promedio en 7,9°C (de 33,7°C a 25,9°C).

9.2.2 Concepción, PMV

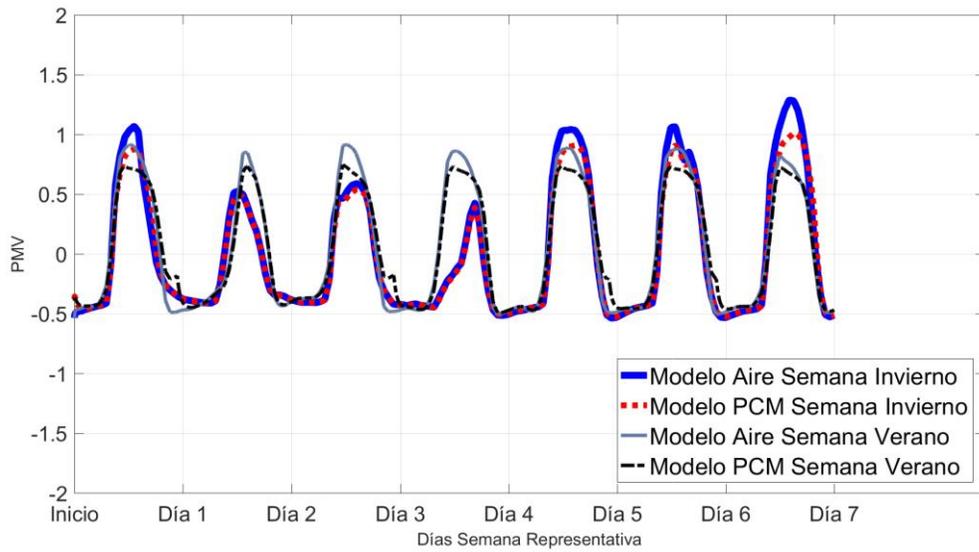


Figura 29 RT25, Concepción, norte.

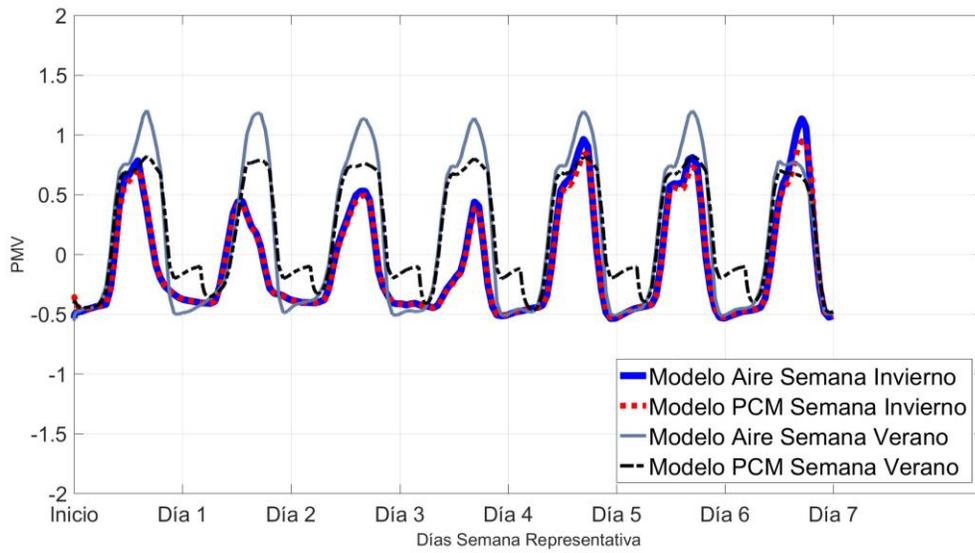


Figura 30 RT25, Concepción, poniente.

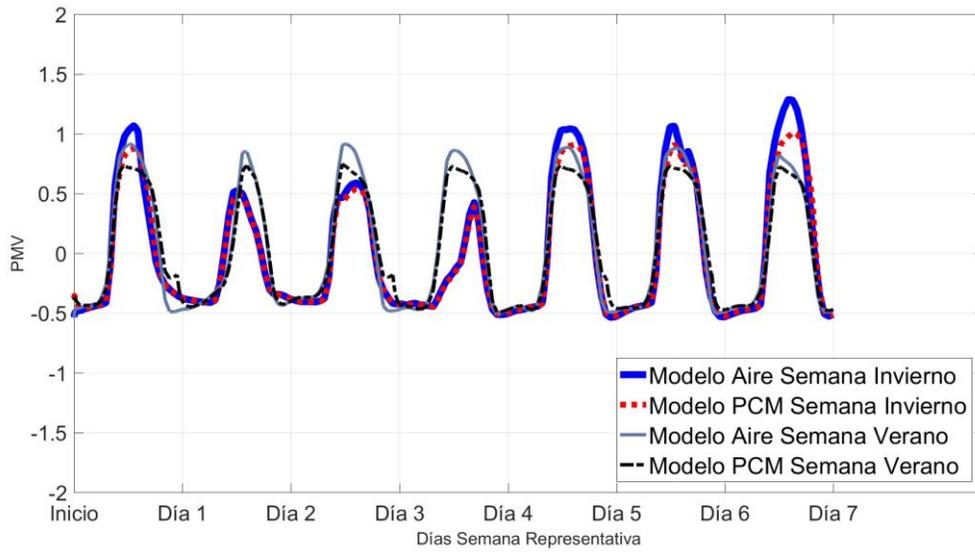


Figura 31 RT25hc, Concepción, norte.

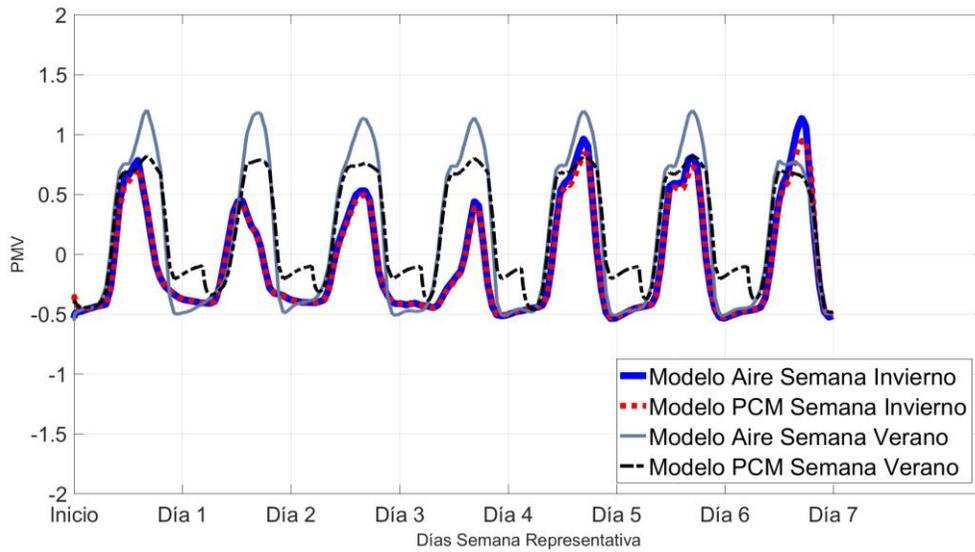


Figura 32 RT25hc, Concepción, poniente.

Tabla 9: Índices PMV, Concepción, orientaciones de ventana norte y poniente

Material/Ciudad/Orientación	Aire Semana Invierno	PCM Semana Invierno	Aire Semana Verano	PCM Semana Verano
RT12 Concepción norte	0,99	0,99	0,88	0,85
RT12 Concepción poniente	0,79	0,76	1,12	1,07
RT25 Concepción norte	0,99	0,83	0,88	0,71
RT25 Concepción poniente	0,79	0,70	1,12	0,78
RT25hc Concepción norte	0,99	0,83	0,88	0,71
RT25hc Concepción poniente	0,79	0,70	1,12	0,78
RT28hc Concepción norte	0,99	0,85	0,88	0,76
RT28hc Concepción poniente	0,79	0,71	1,12	0,85
RT31 Concepción norte	0,99	0,86	0,88	0,76
RT31 Concepción poniente	0,79	0,71	1,12	0,92
RT35 Concepción norte	0,99	0,86	0,88	0,76
RT35 Concepción poniente	0,79	0,71	1,12	0,92

En cuanto al PMV, para la semana de invierno los PCM con mejor rendimiento son el RT25 y RT25hc que en comparación al modelo con aire pasan de un PMV de 1,0 a 0,8.

Para la semana de verano se muestra un mejor rendimiento en el RT25 y RT25hc, se pasa de un PMV 1,1 en el modelo con aire a un PMV igual a 0,8 para el modelo con PCM.

De la Figura 29 a la Figura 32 se puede apreciar que al aplicar el PCM el PMV pasa de estar en un rango de Caluroso-Ligeramente Caluroso a un rango de Ligeramente Caluroso-Neutro.

9.3.1 Copiapó, Temperatura superficie interior ventana

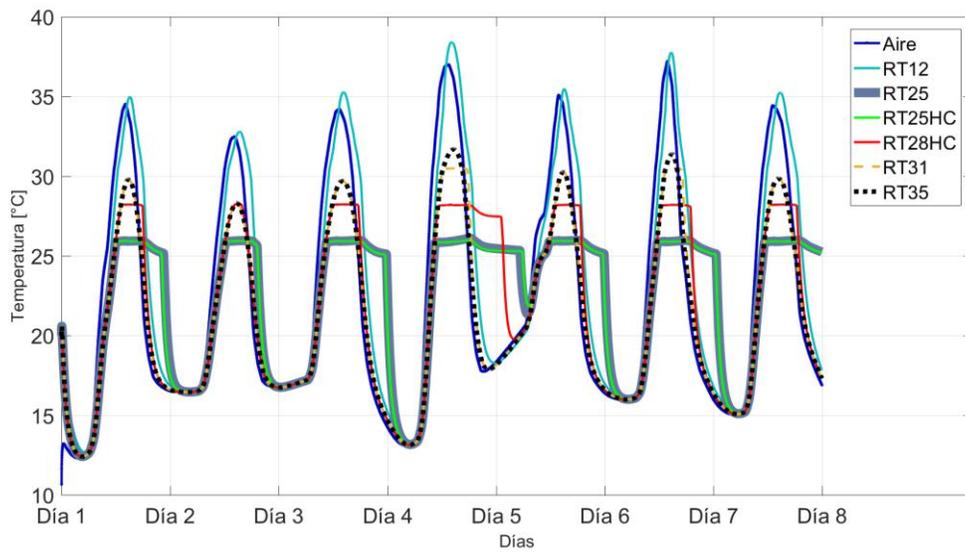


Figura 33 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Copiapó. Orientación ventana: Norte. Semana representativa invierno.

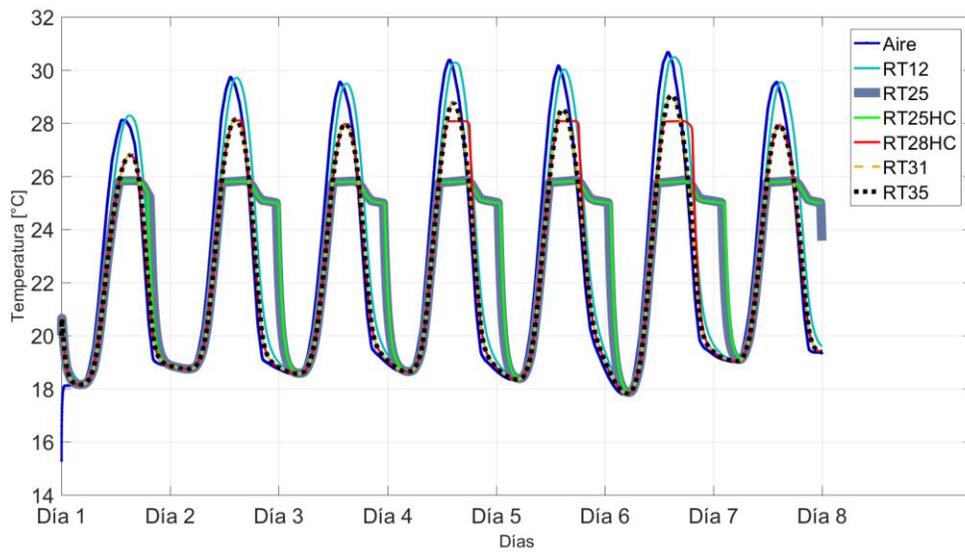


Figura 34 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Copiapó. Orientación ventana: Norte. Semana representativa verano.

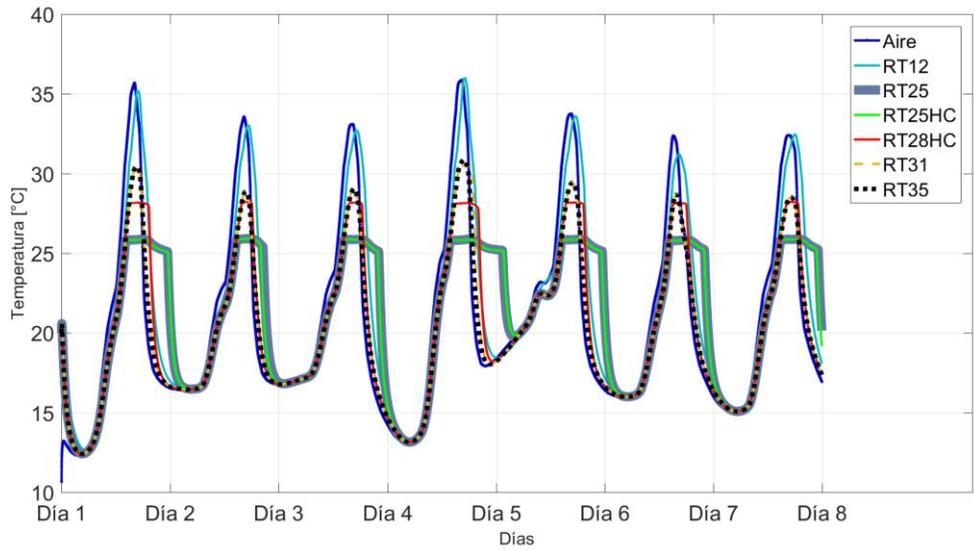


Figura 35 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Copiapó. Orientación ventana: Poniente. Semana representativa invierno.

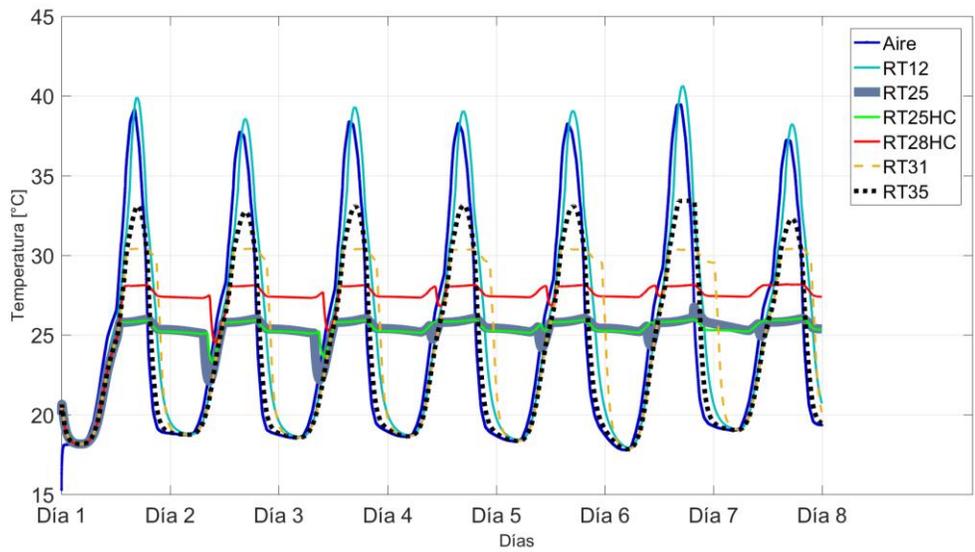


Figura 36 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Copiapó. Orientación ventana: Poniente. Semana representativa verano.

Tabla 10: Temperaturas superficie interior muro ventana, Copiapó, orientaciones de ventana Norte y Poniente

Material/Ciudad/Orientación	Aire Semana Invierno [°C]	PCM Semana Invierno [°C]	Aire Semana Verano [°C]	PCM Semana Verano [°C]
RT12 Copiapó norte	35,0	34,4	29,7	29,2
RT12 Copiapó poniente	33,8	32,4	38,3	37,6
RT25 Copiapó norte	35,0	25,9	29,7	25,8
RT25 Copiapó poniente	33,8	25,8	38,3	25,9
RT25hc Copiapó norte	35,0	25,9	29,7	25,8
RT25hc Copiapó poniente	33,8	25,8	38,3	25,8
RT28hc Copiapó norte	35,0	28,2	29,7	27,7
RT28hc Copiapó poniente	33,8	28,2	38,3	28,1
RT31 Copiapó norte	35,0	29,6	29,7	27,9
RT31 Copiapó poniente	33,8	29,2	38,3	30,4
RT35 Copiapó norte	35,0	29,8	29,7	27,9
RT35 Copiapó poniente	33,8	29,3	38,3	32,4

De la Figura 33 a la Figura 36 se puede apreciar de forma visual el comportamiento de los PCM, con sus fases de carga y descarga. Como se vio en el caso de Santiago, el RT12 no llega al cambio de fase, por lo tanto, el material no es capaz de reducir las temperaturas en comparación a los resultados mostrados por el modelo sin PCM.

Para el caso de Concepción se ve que se produce la descarga de los PCM (a excepción del RT12) para todos los días de las semanas representativas de invierno, para la ventana orientada hacia el norte o hacia el poniente. Sin embargo, para la semana de verano con la ventana orientada hacia el poniente no se produce (en algunos días de forma muy parcial) la descarga del RT25, RT25hc y RT28hc.

De la Tabla 10 es posible verificar que para la semana de invierno los PCM que reducen más los promedios de peaks de temperatura en la semana son el RT25 y RT25hc, reduciendo en 9,1°C el promedio (de 35°C a 25,9°C).

Para la semana de verano se obtiene que el RT25 y RT25hc son los PCM que más reducción del promedio de peaks de la semana generan, se reduce el promedio en 12,5°C (de 38,3°C a 25,8°C).

9.3.2 Copiapó, PMV

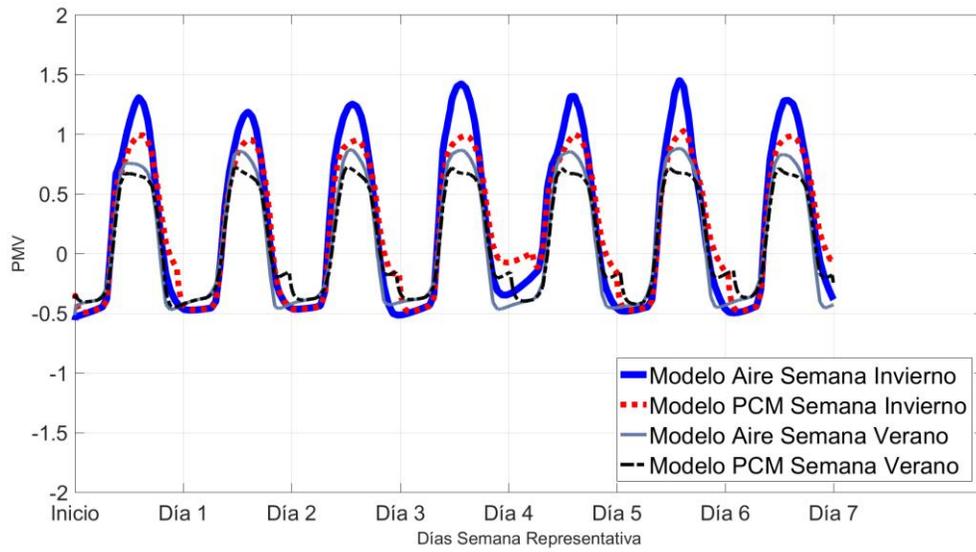


Figura 37 RT25, Copiapó, norte.

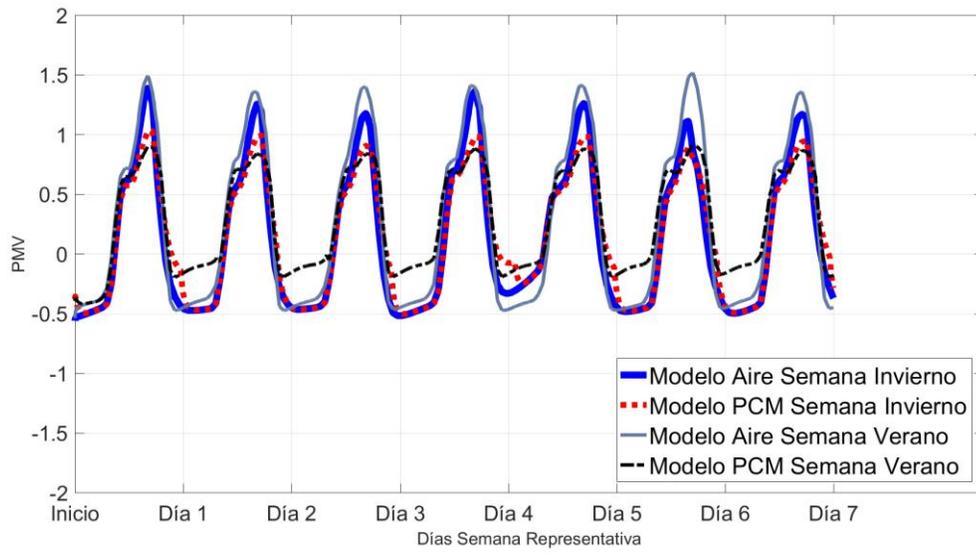


Figura 38 RT25, Copiapó, poniente.

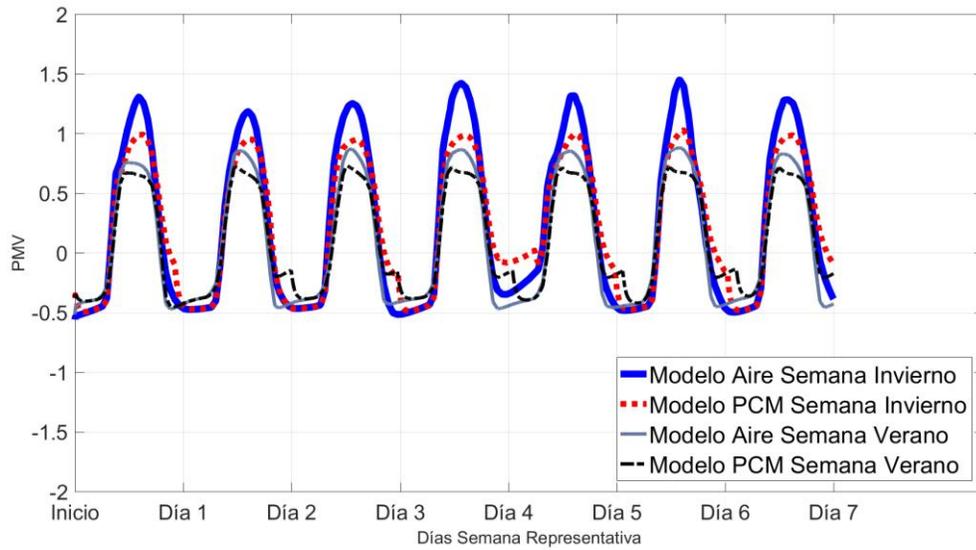


Figura 39 RT25hc, Copiapó, norte.

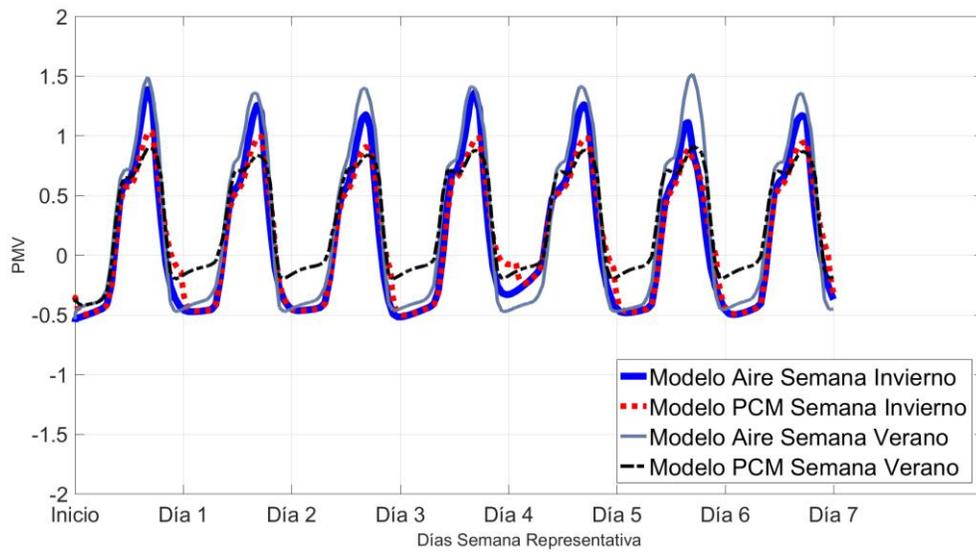


Figura 40 RT25hc, Copiapó, poniente.

Tabla 11: Índices PMV, Copiapó, orientaciones de ventana norte y poniente

Material/Ciudad/Orientación	Aire Semana Invierno	PCM Semana Invierno	Aire Semana Verano	PCM Semana Verano
RT12 Copiapó norte	1,31	1,31	0,86	0,82
RT12 Copiapó poniente	1,24	1,19	1,42	1,44
RT25 Copiapó norte	1,31	0,97	0,86	0,68
RT25 Copiapó poniente	1,24	0,95	1,42	0,86
RT25hc Copiapó norte	1,31	0,97	0,86	0,68
RT25hc Copiapó poniente	1,24	0,95	1,42	0,86
RT28hc Copiapó norte	1,31	1,04	0,86	0,76
RT28hc Copiapó poniente	1,24	1,02	1,42	0,94
RT31 Copiapó norte	1,31	1,09	0,86	0,77
RT31 Copiapó poniente	1,24	1,06	1,42	1,02
RT35 Copiapó norte	1,31	1,10	0,86	0,77
RT35 Copiapó poniente	1,24	1,06	1,42	1,13

En cuanto al PMV, para la semana de invierno los PCM con mejor rendimiento son el RT25 y RT25hc que en comparación al modelo con aire pasan de un PMV de 1,3 a 1,0.

Para la semana de verano se muestra un mejor rendimiento en el RT25 y RT25hc, se pasa de un PMV 1,4 en el modelo con aire a un PMV igual a 0,9 para el modelo con PCM.

De la Figura 37 a la Figura 40 se puede apreciar que al aplicar el PCM el PMV pasa de estar en un rango de Caluroso-Ligeramente Caluroso a un rango de Ligeramente Caluroso-Neutro.

9.4.1 Boulder, Temperatura superficie interior ventana

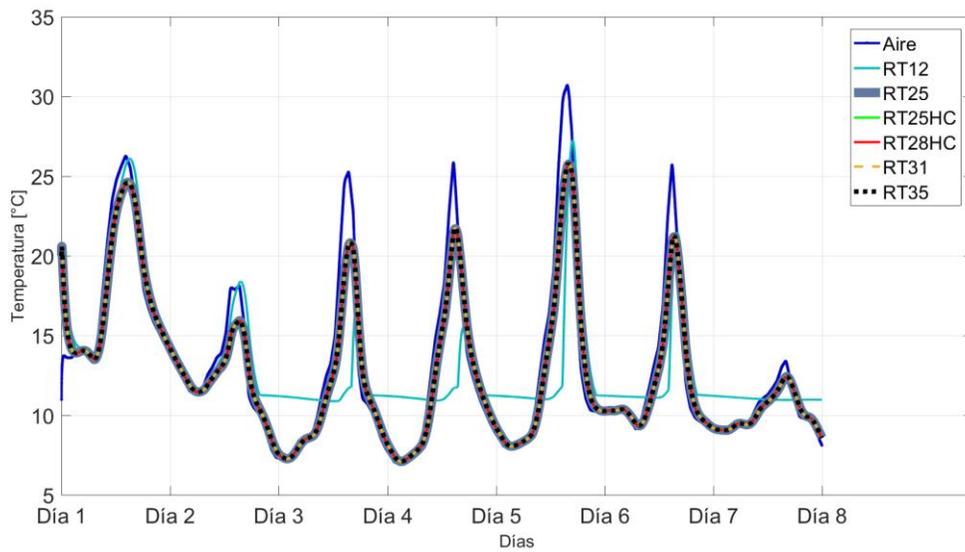


Figura 41 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Boulder. Orientación ventana: Poniente. Semana representativa invierno.

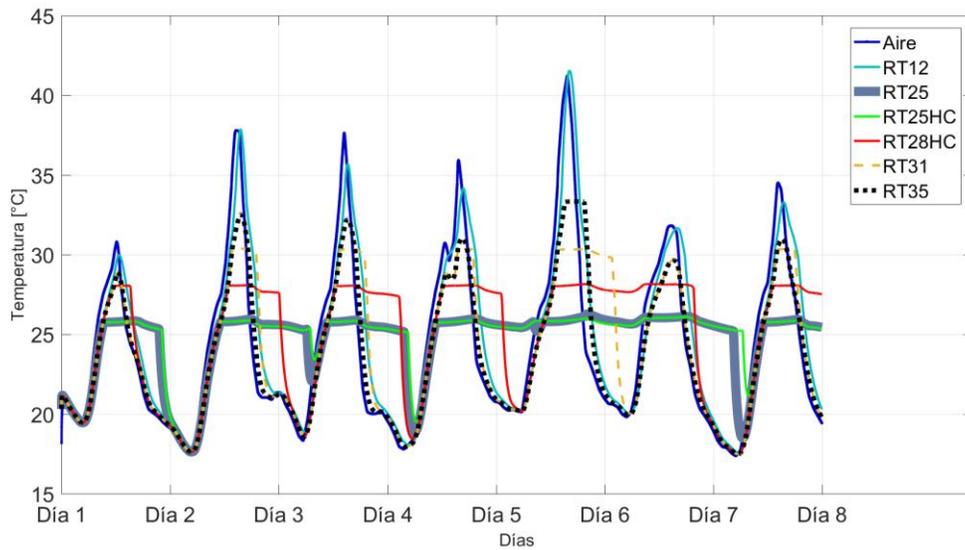


Figura 42 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Boulder. Orientación ventana: Poniente. Semana representativa verano.

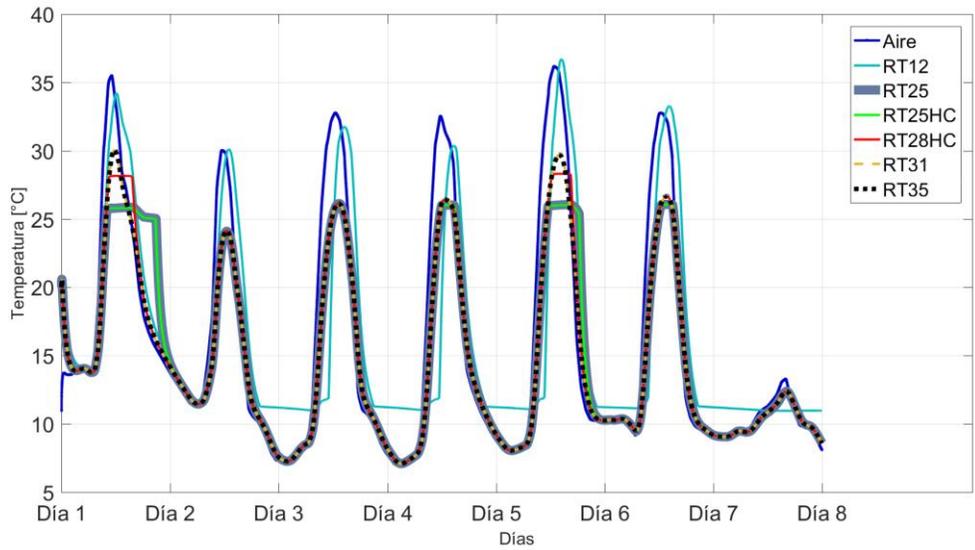


Figura 43 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Boulder. Orientación ventana: Sur. Semana representativa invierno.

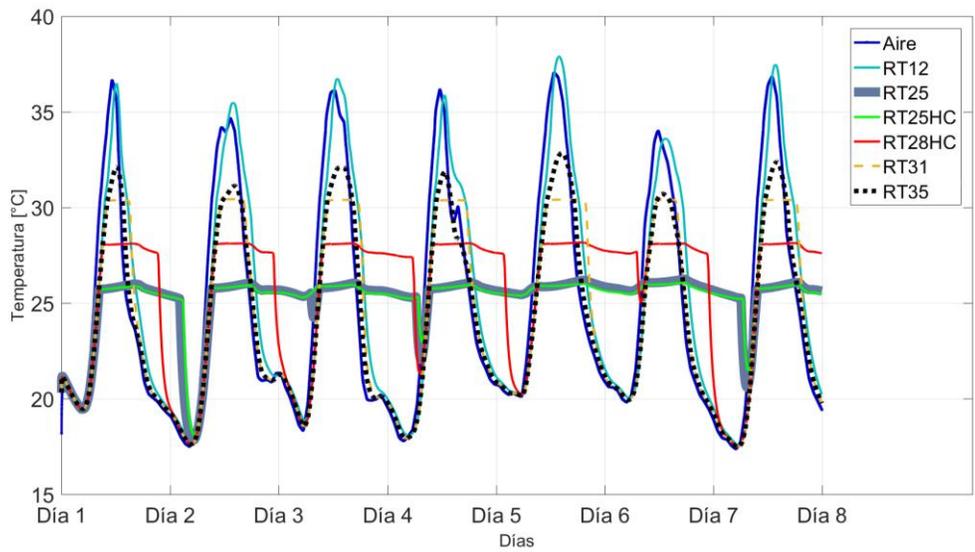


Figura 44 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Boulder. Orientación ventana: Sur. Semana representativa verano.

Tabla 12: Temperaturas superficie interior muro ventana, Boulder, orientaciones de ventana Sur y Poniente

Material/Ciudad/Orientación	Aire Semana Invierno [°C]	PCM Semana Invierno [°C]	Aire Semana Verano [°C]	PCM Semana Verano [°C]
RT12 Boulder sur	30,6	25,7	35,9	35,1
RT12 Boulder poniente	24,3	17,8	35,7	33,4
RT25 Boulder sur	30,6	23,8	35,9	25,8
RT25 Boulder poniente	24,3	20,5	35,7	25,9
RT25hc Boulder sur	30,6	23,8	35,9	25,8
RT25hc Boulder poniente	24,3	20,5	35,7	25,8
RT28hc Boulder sur	30,6	24,5	35,9	28,1
RT28hc Boulder poniente	24,3	20,6	35,7	28,1
RT31 Boulder sur	30,6	24,8	35,9	30,4
RT31 Boulder poniente	24,3	20,6	35,7	30,0
RT35 Boulder sur	30,6	24,8	35,9	31,4
RT35 Boulder poniente	24,3	20,6	35,7	30,9

De la Figura 41 a la Figura 44 se puede apreciar de forma visual el comportamiento de los PCM, con sus fases de carga y descarga. En el caso de Boulder, para las semanas de invierno, se aprecian temperaturas menores que las mostradas en las ciudades de Chile, por lo que en este caso si se produce el cambio de fase en el RT12, se ve como a partir del día 3 hay periodos del día en que se produce una estabilización de las temperaturas alrededor de los 12°C. En cuanto a los otros PCM se ve que no hay activación de los PCM en la semana de invierno para la ventana orientada hacia el sur dado que ninguno de los materiales llega a su temperatura de activación. Para la semana de invierno en la orientación poniente se ve activación de los PCM a excepción del RT31 y RT25.

Para las semanas de verano se ve la activación de los PCM, pero además se observa que el RT25, RT25hc y en menor medida el RT28hc no se descargan para algunos de los días de la semana.

De la Tabla 12 es posible verificar que para la semana de invierno los PCM que reducen más los promedios de peaks de temperatura en la semana son el RT25 y RT25hc, reduciendo en 6,8°C el promedio (de 30,6°C a 23,8°C).

Para la semana de verano se obtiene que el RT25 y RT25hc son los PCM que más reducción del promedio de peaks de la semana generan, se reduce el promedio en 10,1°C (de 35,9°C a 25,8°C).

9.4.2 Boulder, PMV

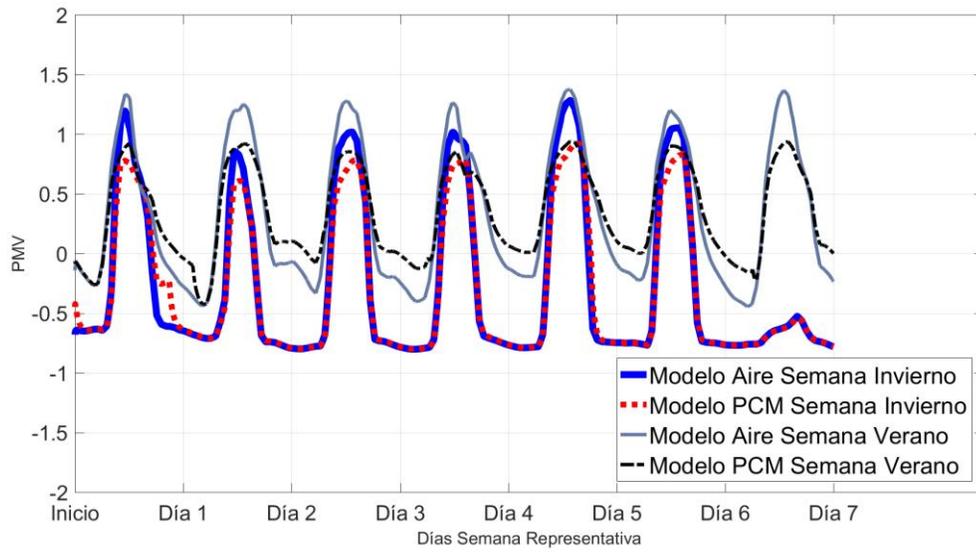


Figura 45 RT25, Boulder, sur.

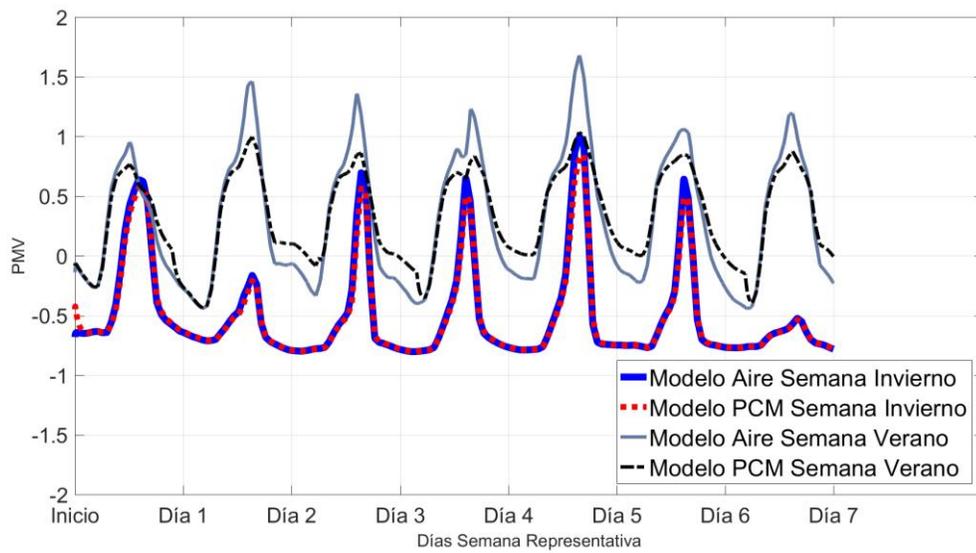


Figura 46 RT25, Boulder, poniente.

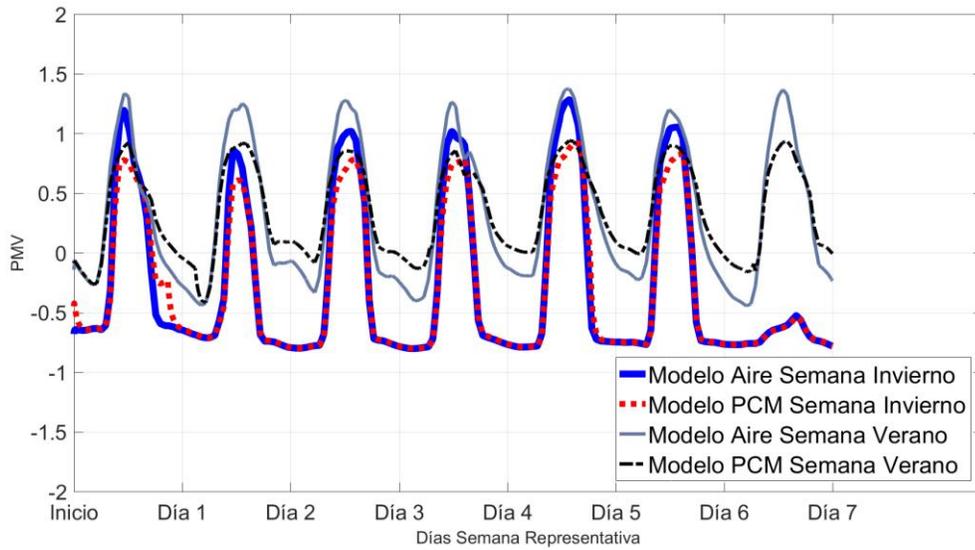


Figura 47 RT25hc, Boulder, sur.

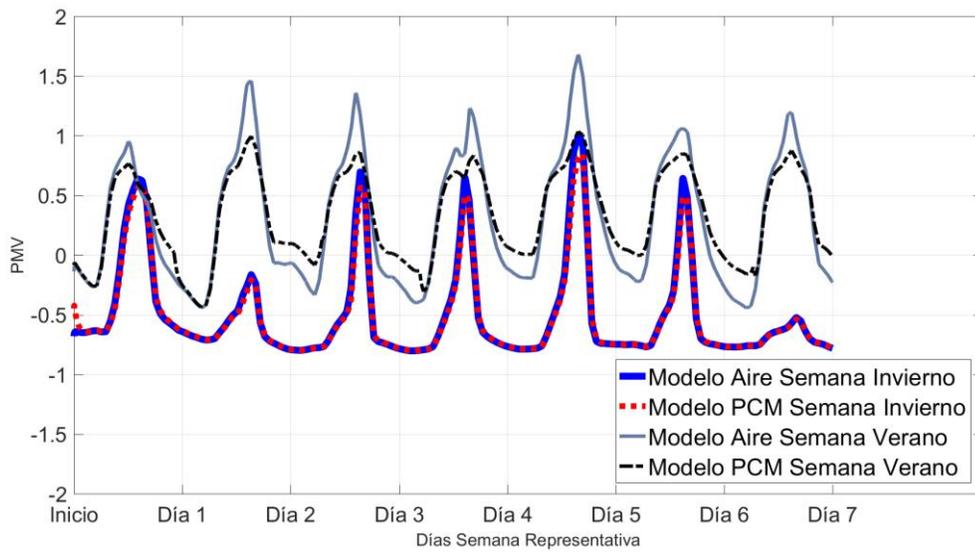


Figura 48 RT25hc, Boulder, poniente.

Tabla 13: Índices PMV, Boulder, orientaciones de ventana sur y poniente

Material/Ciudad/Orientación	Aire Semana Invierno	PCM Semana Invierno	Aire Semana Verano	PCM Semana Verano
RT12 Boulder sur	0,84	0,71	1,29	1,26
RT12 Boulder poniente	0,58	0,42	1,28	1,19
RT25 Boulder sur	0,84	0,57	1,29	0,89
RT25 Boulder poniente	0,58	0,46	1,28	0,88
RT25hc Boulder sur	0,84	0,57	1,29	0,89
RT25hc Boulder poniente	0,58	0,46	1,28	0,88
RT28hc Boulder sur	0,84	0,60	1,29	0,96
RT28hc Boulder poniente	0,58	0,47	1,28	0,95
RT31 Boulder sur	0,84	0,61	1,29	1,04
RT31 Boulder poniente	0,58	0,47	1,28	1,02
RT35 Boulder sur	0,84	0,61	1,29	1,09
RT35 Boulder poniente	0,58	0,47	1,28	1,06

En cuanto al PMV, para la semana de invierno los PCM con mejor rendimiento son el RT25 y RT25hc que en comparación al modelo con aire pasan de un PMV de 0,8 a 0,6.

Para la semana de verano se muestra un mejor rendimiento en el RT25 y RT25hc, se pasa de un PMV 1,3 en el modelo con aire a un PMV igual a 0,9 para el modelo con PCM.

De la Figura 45 a la Figura 48 se puede apreciar que al aplicar el PCM el PMV pasa de estar en un rango de Caluroso-Ligeramente Caluroso a un rango de Ligeramente Caluroso-Neutro.

9.5.1 Vancouver, Temperatura superficie interior ventana

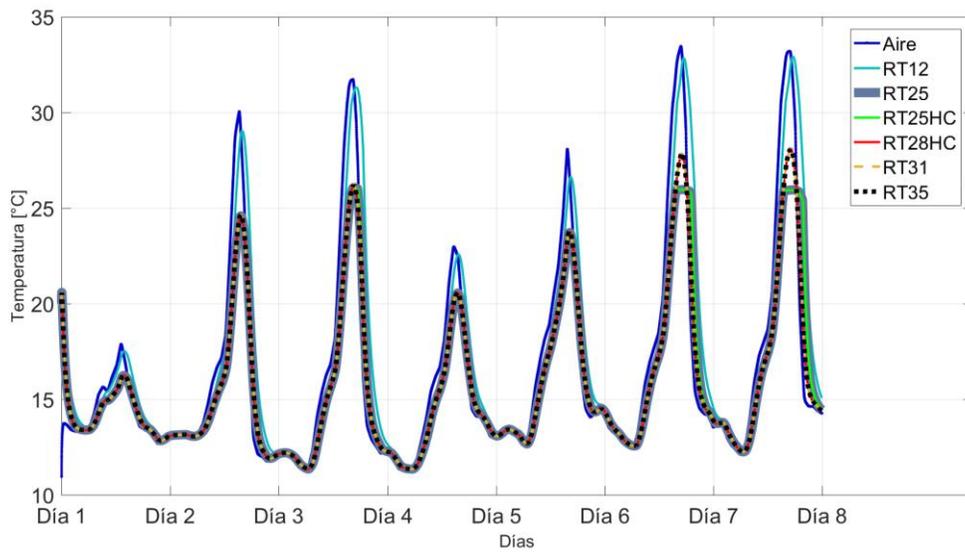


Figura 49 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Vancouver. Orientación ventana: Poniente. Semana representativa invierno.

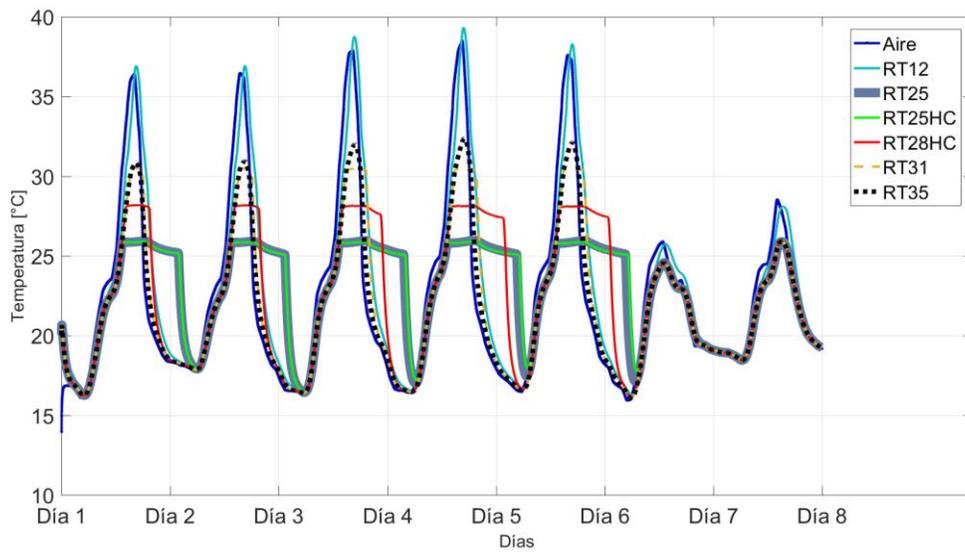


Figura 50 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Vancouver. Orientación ventana: Poniente. Semana representativa verano.

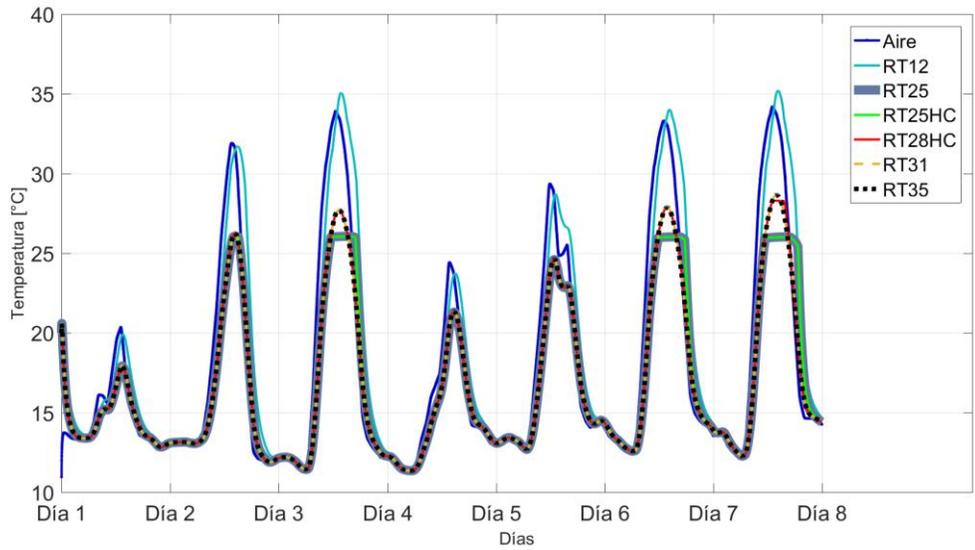


Figura 51 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Vancouver. Orientación ventana: Sur. Semana representativa invierno.

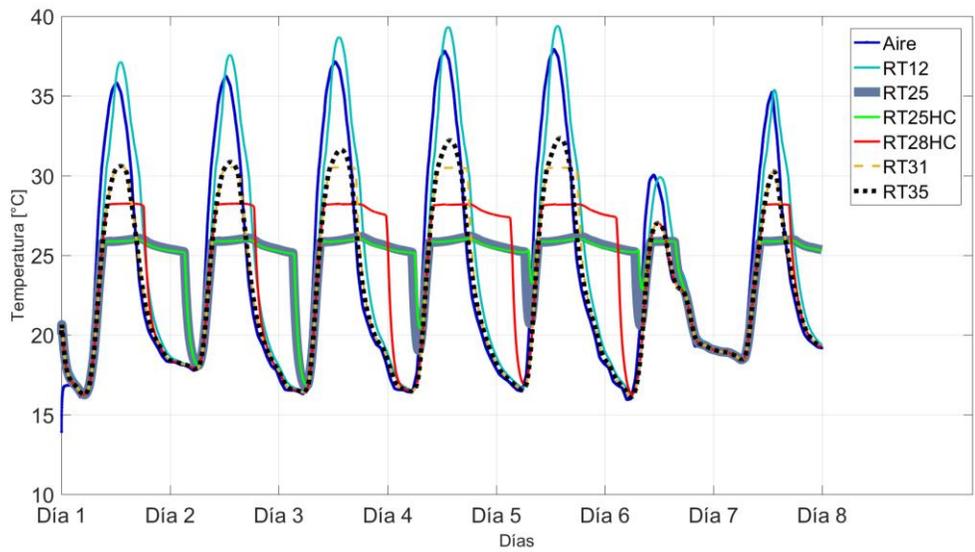


Figura 52 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: Vancouver. Orientación ventana: Sur. Semana representativa verano.

Tabla 14: Temperaturas superficie interior muro ventana, Vancouver, orientaciones de ventana Sur y Poniente

Material/Ciudad/Orientación	Aire Semana Invierno [°C]	PCM Semana Invierno [°C]	Aire Semana Verano [°C]	PCM Semana Verano [°C]
RT12 Vancouver sur	30,4	29,2	35,7	36,0
RT12 Vancouver poniente	28,2	26,8	34,5	33,7
RT25 Vancouver sur	30,4	24,4	35,7	25,9
RT25 Vancouver poniente	28,2	23,1	34,5	25,6
RT25hc Vancouver sur	30,4	24,4	35,7	25,9
RT25hc Vancouver poniente	28,2	23,1	34,5	25,6
RT28hc Vancouver sur	30,4	25,2	35,7	28,0
RT28hc Vancouver poniente	28,2	23,7	34,5	27,2
RT31 Vancouver sur	30,4	25,2	35,7	29,9
RT31 Vancouver poniente	28,2	23,7	34,5	28,9
RT35 Vancouver sur	30,4	25,2	35,7	30,4
RT35 Vancouver poniente	28,2	23,7	34,5	29,5

De la Figura 49 a la Figura 52 se puede apreciar de forma visual el comportamiento de los PCM, con sus fases de carga y descarga. Como se vio en el caso de Santiago, el RT12 no llega al cambio de fase, por lo tanto, el material no es capaz de reducir las temperaturas en comparación a los resultados mostrados por el modelo sin PCM.

Para el caso de Vancouver se ve que se produce la descarga de los PCM (a excepción del RT12) para todos los días de las semanas representativas de invierno, sin embargo, para la semana de verano con la ventana orientada hacia el poniente se observa que el RT25 y RT25hc se descargan de forma incompleta.

De la Tabla 14 es posible verificar que para la semana de invierno los PCM que reducen más los promedios de peaks de temperatura en la semana son el RT25 y RT25hc, reduciendo en 6,0°C el promedio (de 30,4°C a 24,4°C).

Para la semana de verano se obtiene que el RT25 y RT25hc son los PCM que más reducción del promedio de peaks de la semana generan, se reduce el promedio en 9,9°C (de 35,7°C a 25,9°C).

9.5.2 Vancouver, PMV

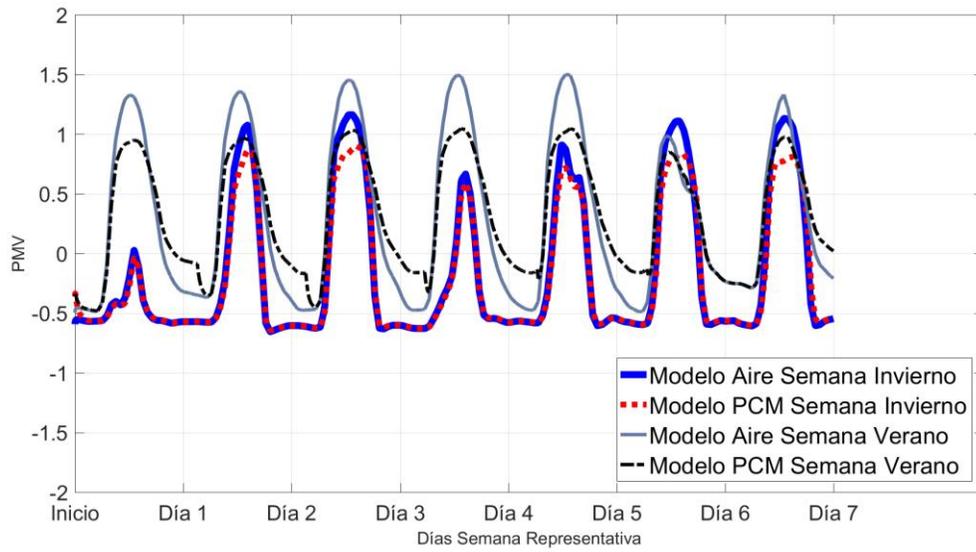


Figura 53 RT25, Vancouver, sur.

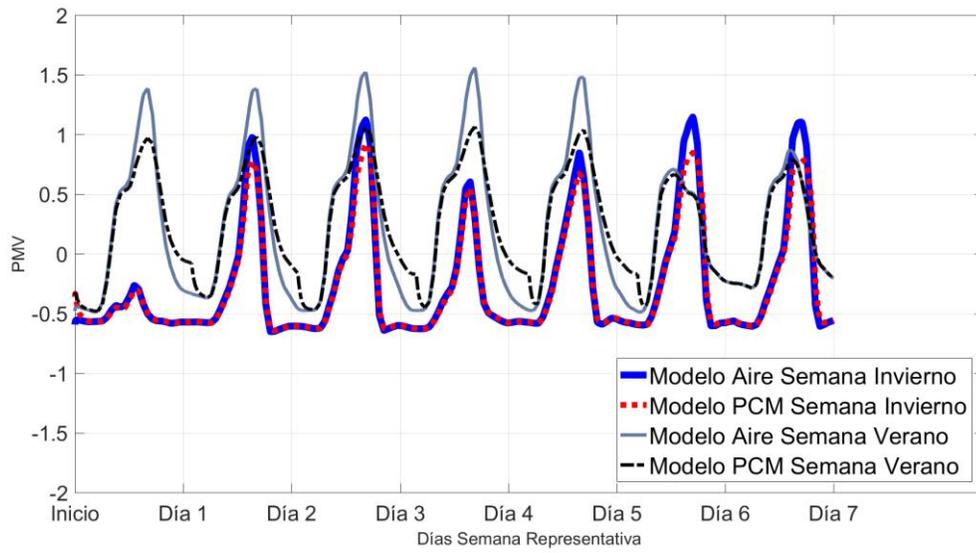


Figura 54 RT25, Vancouver, poniente.

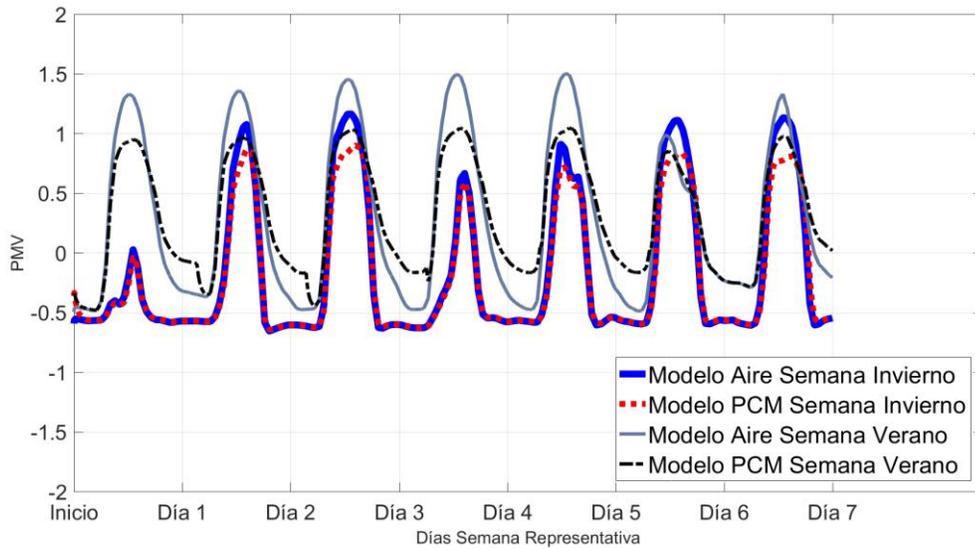


Figura 55 RT25hc, Vancouver, sur.

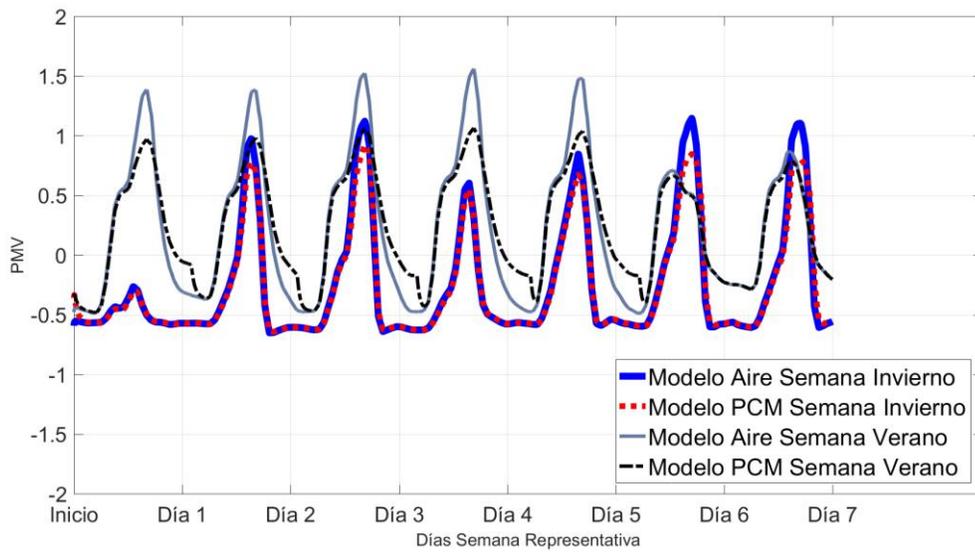


Figura 56 RT25hc, Vancouver, poniente.

Tabla 15: Índices PMV, Vancouver, orientaciones de ventana sur y poniente

Material/Ciudad/Orientación	Aire Semana Invierno	PCM Semana Invierno	Aire Semana Verano	PCM Semana Verano
RT12 Vancouver sur	1,10	1,10	1,35	1,37
RT12 Vancouver poniente	0,82	0,77	1,27	1,27
RT25 Vancouver sur	1,10	0,82	1,35	0,96
RT25 Vancouver poniente	0,82	0,64	1,27	0,93
RT25hc Vancouver sur	1,10	0,82	1,35	0,96
RT25hc Vancouver poniente	0,82	0,64	1,27	0,93
RT28hc Vancouver sur	1,10	0,87	1,35	1,02
RT28hc Vancouver poniente	0,82	0,66	1,27	0,98
RT31 Vancouver sur	1,10	0,87	1,35	1,09
RT31 Vancouver poniente	0,82	0,66	1,27	1,03
RT35 Vancouver sur	1,10	0,87	1,35	1,11
RT35 Vancouver poniente	0,82	0,66	1,27	1,06

En cuanto al PMV, para la semana de invierno los PCM con mejor rendimiento son el RT25 y RT25hc que en comparación al modelo con aire pasan de un PMV de 1,1 a 0,8.

Para la semana de verano se muestra un mejor rendimiento en el RT25 y RT25hc, se pasa de un PMV 1,3 en el modelo con aire a un PMV igual a 1,0 para el modelo con PCM.

De la Figura 53 a la Figura 56 se puede apreciar que al aplicar el PCM el PMV pasa de estar en un rango de Caluroso-Ligeramente Caluroso a un rango de Ligeramente Caluroso-Neutro.

9.3.1 El Paso, Temperatura superficie interior ventana

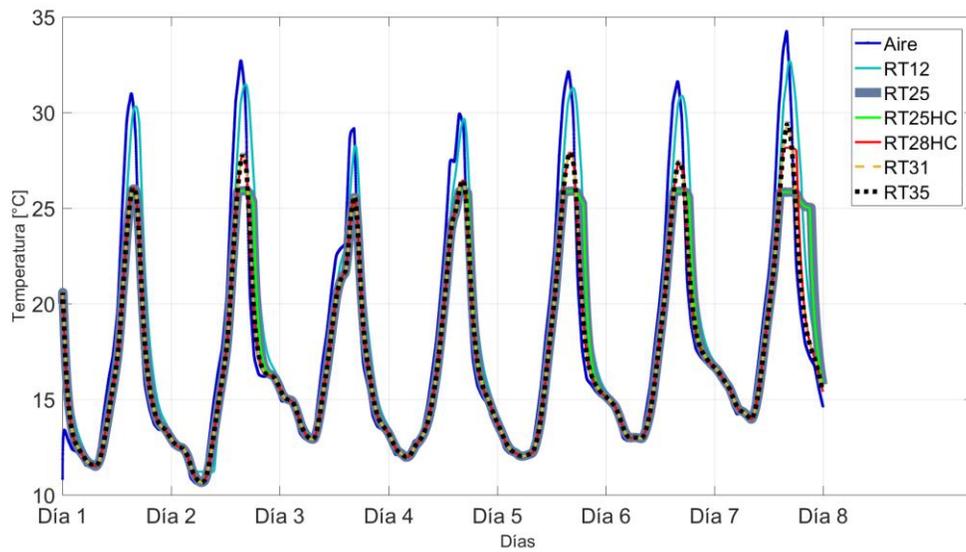


Figura 57 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: El Paso. Orientación ventana: Poniente. Semana representativa invierno.

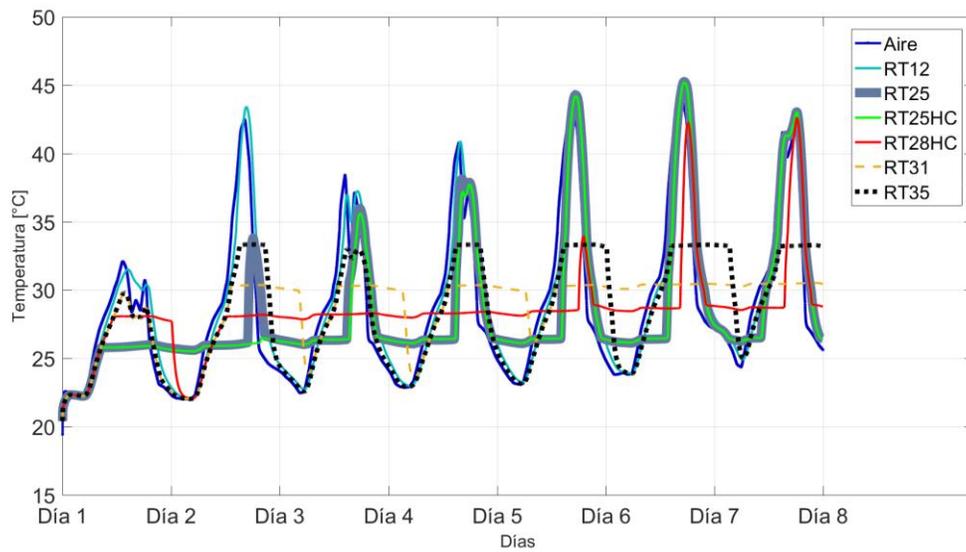


Figura 58 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: El Paso. Orientación ventana: Poniente. Semana representativa verano.

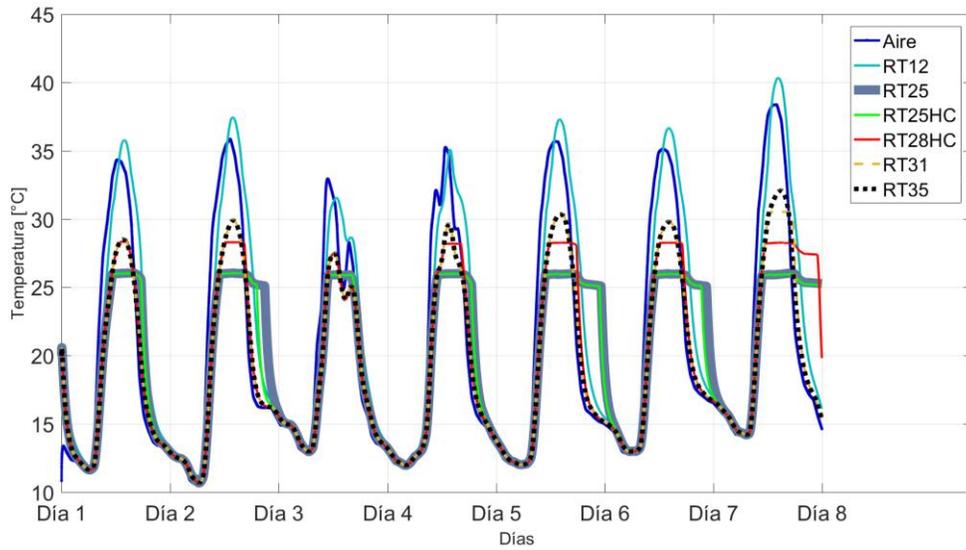


Figura 59 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: El Paso. Orientación ventana: Sur. Semana representativa invierno.

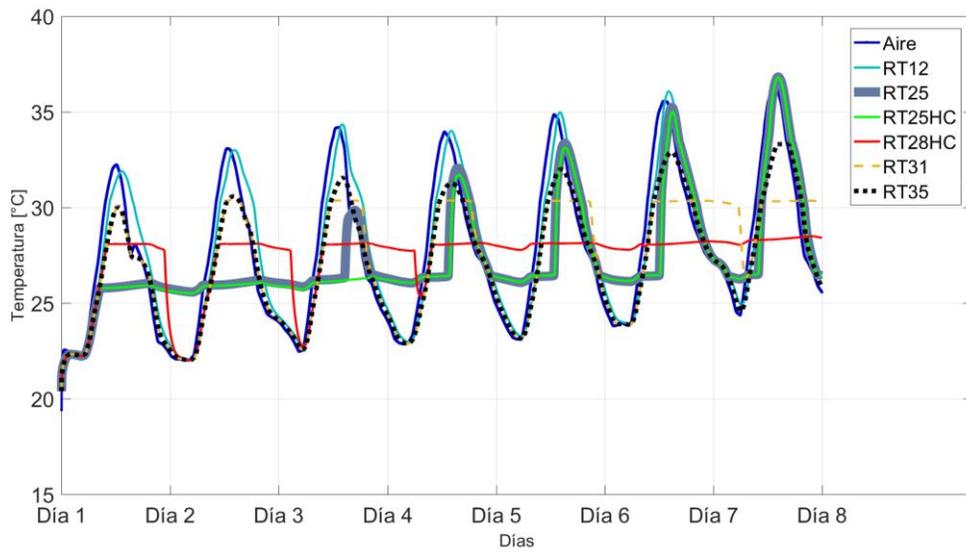


Figura 60 Resultados modelo ventana doble panel de vidrio, comparación entre modelo con Aire y modelos con PCM. Ubicación: El Paso. Orientación ventana: Sur. Semana representativa verano.

Tabla 16: Temperaturas superficie interior muro ventana, El Paso, orientaciones de ventana Sur y Poniente

Material/Ciudad/Orientación	Aire Semana Invierno [°C]	PCM Semana Invierno [°C]	Aire Semana Verano [°C]	PCM Semana Verano [°C]
RT12 El Paso sur	35,4	34,7	34,3	33,6
RT12 El Paso poniente	31,5	29,8	41,8	41,6
RT25 El Paso sur	35,4	25,9	34,3	28,6
RT25 El Paso poniente	31,5	25,8	41,8	37,0
RT25hc El Paso sur	35,4	25,9	34,3	28,4
RT25hc El Paso poniente	31,5	25,8	41,8	36,7
RT28hc El Paso sur	35,4	27,9	34,3	28,1
RT28hc El Paso poniente	31,5	26,8	41,8	31,1
RT31 El Paso sur	35,4	28,9	34,3	30,3
RT31 El Paso poniente	31,5	27,0	41,8	30,4
RT35 El Paso sur	35,4	29,0	34,3	31,3
RT35 El Paso poniente	31,5	27,0	41,8	33,2

De la Figura 57 a la Figura 60 se puede apreciar de forma visual el comportamiento de los PCM, con sus fases de carga y descarga. Para las semanas de invierno y verano el RT12 no produce la descarga del material ya que las temperaturas resultantes están siempre por sobre la temperatura de activación, al no producirse el cambio de fase para el RT12, este material no presenta capacidad de almacenamiento de energía y por lo tanto entrega valores similares a los que da el modelo sin PCM.

En el caso de El Paso, en la semana de invierno con la ventana orientada hacia el sur, se produce la carga y descarga en todos los días de la semana para los PCM (a excepción del RT12). Para la semana de invierno con la ventana orientada hacia el poniente no se produce la descarga del RT28hc y para el RT25 y RT25hc se produce una elevación en las temperaturas resultantes del modelo, llegando a equipararse al modelo sin PCM, este efecto se ve acentuado en la semana de verano con la ventana orientada hacia el poniente.

De la Tabla 16 es posible verificar que para la semana de invierno los PCM que reducen más los promedios de peaks de temperatura en la semana son el RT25 y RT25hc, reduciendo en 9,4°C el promedio (de 35,4°C a 25,9°C).

Para la semana de verano se obtiene que el RT31 es el PCM que más reducción del promedio de peaks de la semana genera, se reduce el promedio en 11,4°C (de 41,8°C a 30,4°C).

9.3.2 El Paso, PMV

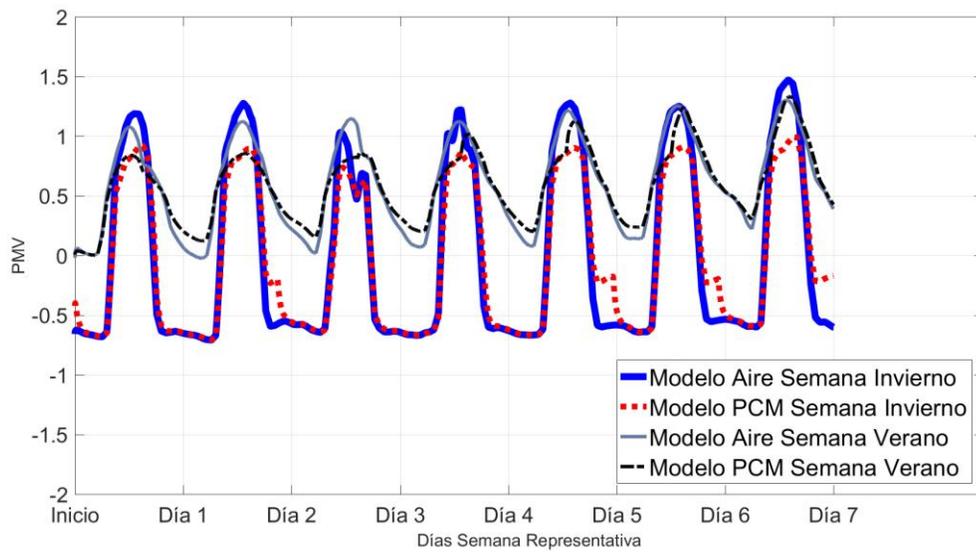


Figura 61 RT25, El Paso, sur.

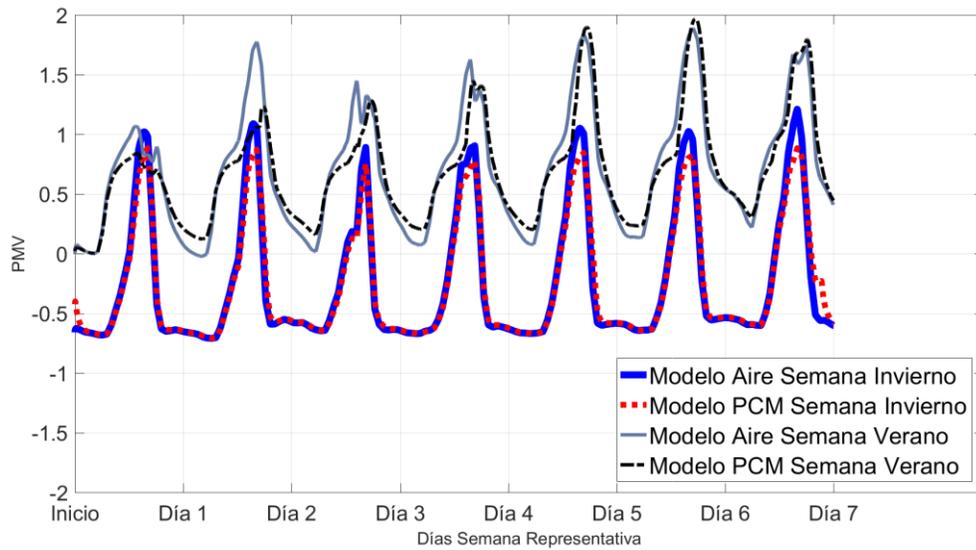


Figura 62 RT25, El Paso, poniente.

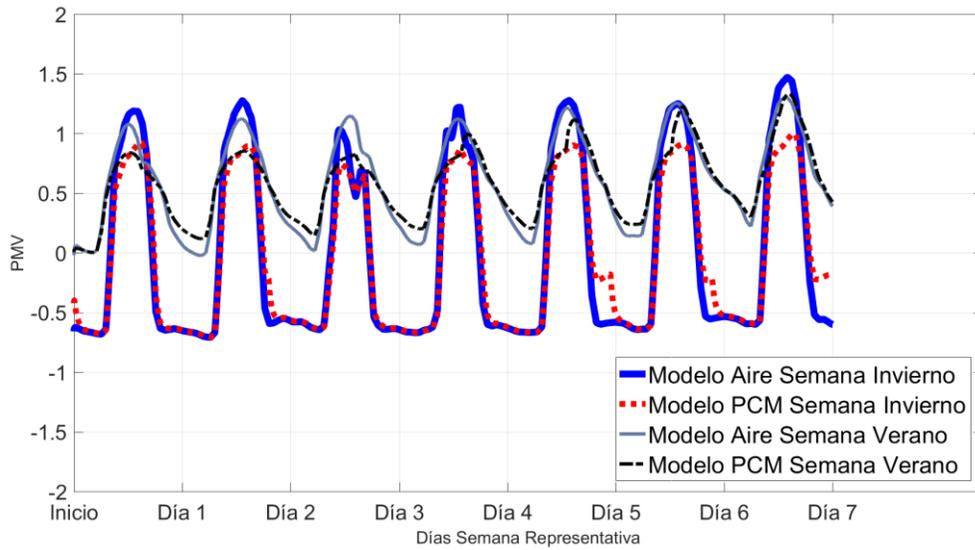


Figura 63 RT25hc, El Paso, sur.

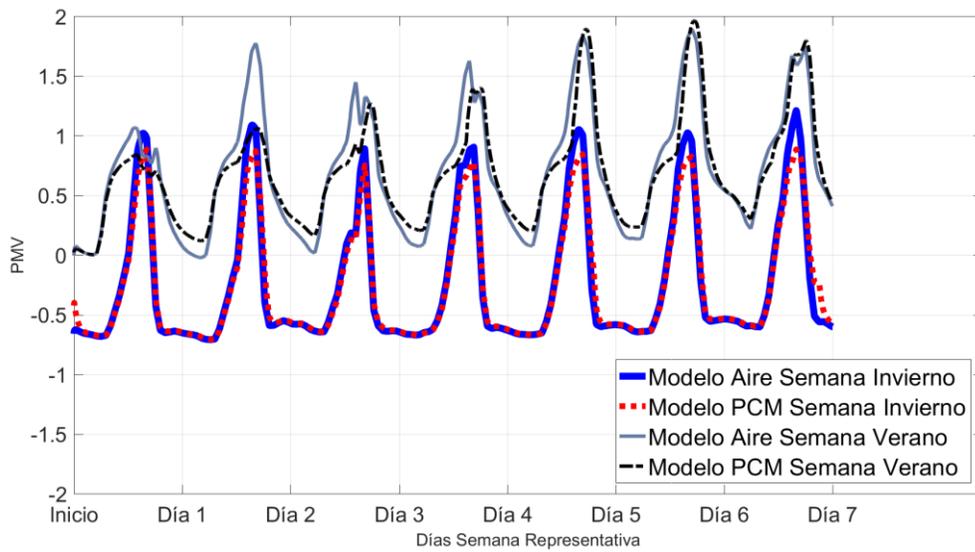


Figura 64 RT25hc, El Paso, poniente.

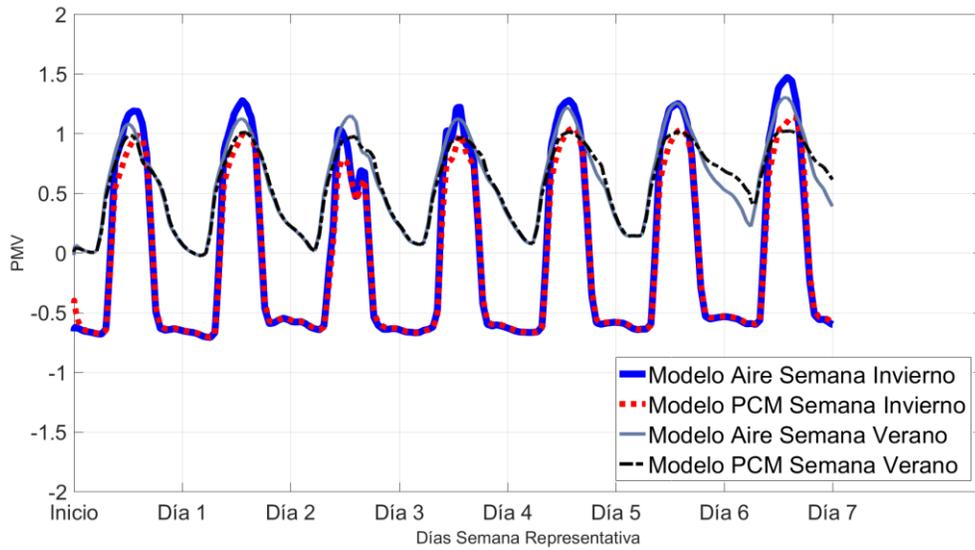


Figura 65 RT31, El Paso, sur.

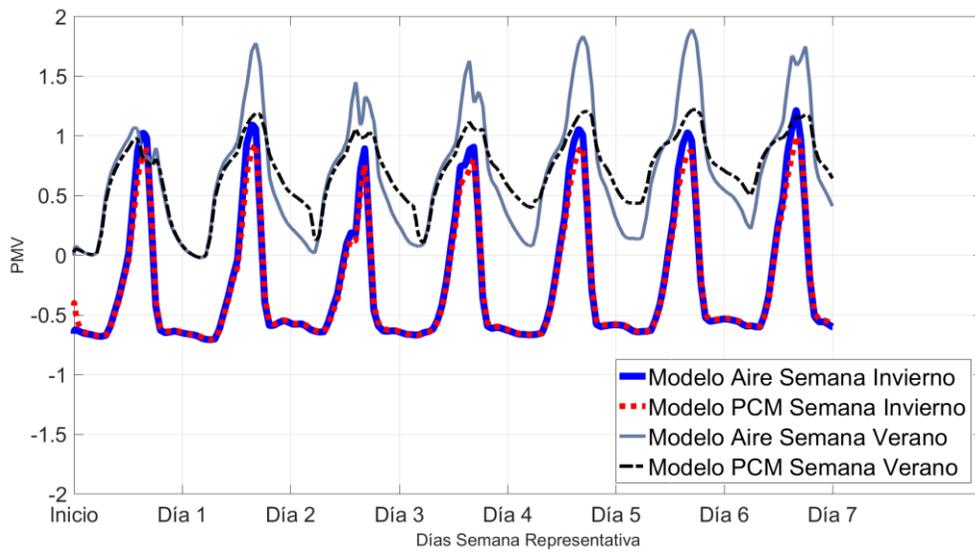


Figura 66 RT31, El Paso, poniente.

Tabla 17: Índices PMV, El Paso, orientaciones de ventana sur y poniente

Material/Ciudad/Orientación	Aire Semana Invierno	PCM Semana Invierno	Aire Semana Verano	PCM Semana Verano
RT12 El Paso sur	1,27	1,34	1,18	1,16
RT12 El Paso poniente	1,03	0,97	1,71	1,71
RT25 El Paso sur	1,27	0,89	1,18	0,96
RT25 El Paso poniente	1,03	0,81	1,71	1,49
RT25hc El Paso sur	1,27	0,89	1,18	0,95
RT25hc El Paso poniente	1,03	0,81	1,71	1,48
RT28hc El Paso sur	1,27	0,96	1,18	0,91
RT28hc El Paso poniente	1,03	0,85	1,71	1,20
RT31 El Paso sur	1,27	1,01	1,18	0,99
RT31 El Paso poniente	1,03	0,85	1,71	1,15
RT35 El Paso sur	1,27	1,01	1,18	1,04
RT35 El Paso poniente	1,03	0,85	1,71	1,26

En cuanto al PMV, de la Figura 61 a la Figura 66 se puede apreciar que para la semana de invierno los PCM con mejor rendimiento son el RT25 y RT25hc que en comparación al modelo con aire pasan de un PMV de 1,3 a 0,9.

Para la semana de verano se muestra un mejor rendimiento en el RT31, se pasa de un PMV 1,7 en el modelo con aire a un PMV igual a 1,2 para el modelo con PCM. En este caso vemos un cambio en los PCM con mejor rendimiento, ya que el RT25 y RT25hc no tienen un buen rendimiento acá debido a las altas temperaturas presentes, estas condiciones climáticas generan un comportamiento especial en algunos PCM.

En este caso debiese considerarse usar un método de protección solar para evitar este tipo de problemas ya que vemos además que el índice PMV no baja del valor 1 y se mantiene en un rango superior.

10 Análisis Resultados

Los resultados mostrados anteriormente son producto de simulaciones hechas en Matlab con datos extraídos de EnergyPlus, El análisis hecho en esta sección se sustenta en lo expuesto en capítulos anteriores, sobre todo en el capítulo de modelación y cambio de fase (Capítulos 7.1 y 7.2 respectivamente).

Los resultados muestran que al aplicar PCM como relleno del doble panel de vidrio se tiene en general una reducción de los peaks de temperatura alcanzados en cada día de la semana en comparación al modelo en donde se tiene un relleno de aire para el doble panel de vidrio (a excepción del RT12 que muestra resultados muy similares al modelo sin PCM). Además, se muestra un desfase en los peaks de temperatura durante los días de la semana al comparar los dos materiales (aire y PCM), debido a que los PCM evaluados poseen mayor calor específico que el aire y por lo tanto tienen una difusividad térmica menor, lo cual produce el desfase en las temperaturas. Estos resultados se presentan en todos los casos estudiados, sin embargo, no se presentan siempre para el mismo PCM.

En este análisis se describen tres fenómenos principales, la activación del PCM posterior a su etapa de carga, la descarga del PCM y la no descarga del PCM, que en el caso de El Paso se produce además un efecto de agotamiento de la capacidad de almacenamiento de energía del PCM. Para facilitar la lectura del análisis de resultados se explican estos fenómenos tomando solo el caso de Santiago y El Paso, no obstante, se puede encontrar que ocurre lo mismo en los demás casos. En la Figura 67 se muestra el caso de Santiago para la semana de invierno con la ventana orientada hacia el norte, se hace un acercamiento en el segundo día de la semana para apreciar la reducción y desfase de temperatura entre los distintos materiales.

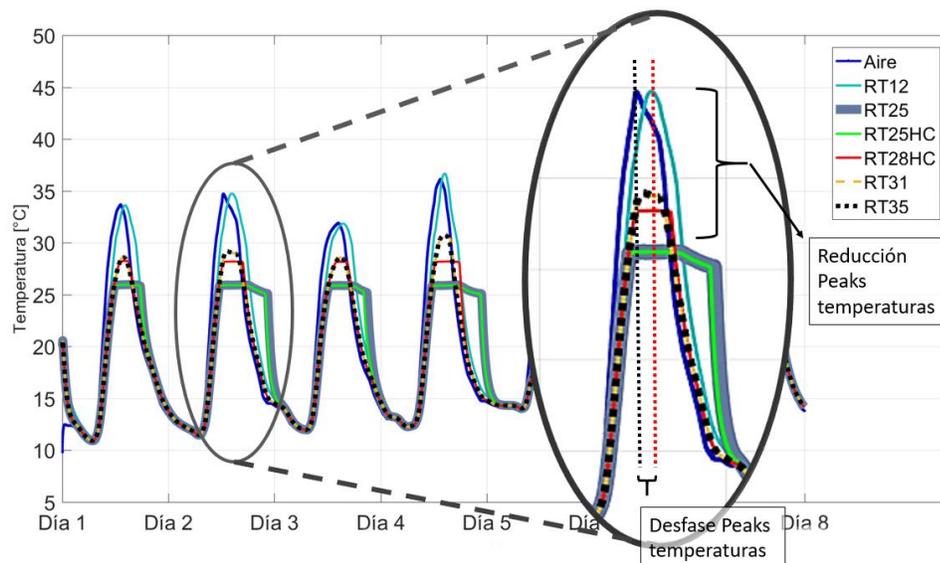


Figura 67 Detalle del efecto del PCM para el caso visto en Figura 17.

Cuando se produce la activación del PCM (es decir cuando el material entra en el cambio de fase), se ve de forma característica en curvas de temperatura superficial de la ventana como la temperatura se mantiene cercana a la temperatura de activación característica del material, esta fase de estancamiento de la temperatura se mantiene en las horas de mayor temperatura del día y posteriormente en las horas de temperaturas más bajas se produce la descarga del material. En esta parte de las curvas que corresponden por lo general a las últimas horas del día, se produce la sobreposición de las curvas, ya que para temperaturas bajas las propiedades de los materiales presentan características similares con lo que respecta a la transferencia de calor (valores similares de conductividad térmica, densidad y calor específico).

El RT12 es un PCM que en general no pasa por el cambio de fase (a excepción del caso de Boulder en las semanas de invierno, Figura 41 y Figura 43) y que por lo tanto no presenta la característica principal que se quiere resaltar en este trabajo, que es el efecto de reducción y desfase de las temperaturas en la ventana. Esto se debe a que el RT12 esta siempre en estado líquido y por lo tanto no pasa por el cambio de fase sólido-líquido que permite almacenar energía manteniendo la temperatura a cambio de la reestructuración física de la materia, de esta forma se produce un efecto directo sobre el calor sensible del material y por lo tanto la temperatura varía como si se tratara del modelo sin PCM. Por lo tanto, el RT12, para la mayoría de las condiciones modeladas no presenta capacidad de almacenamiento de energía.

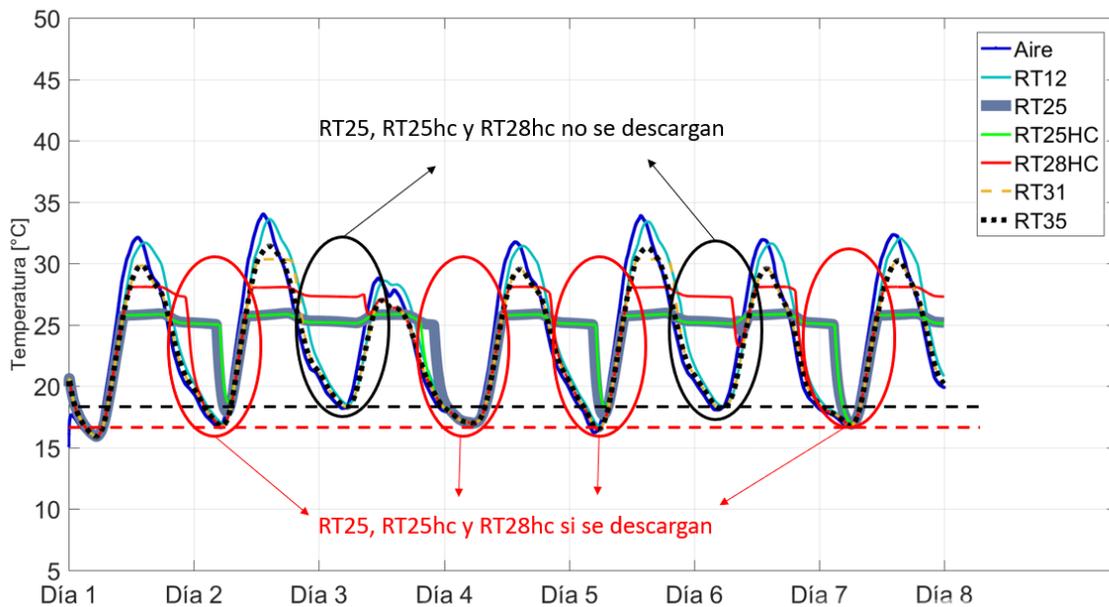


Figura 68 Santiago, orientación ventana norte, semana representativa de invierno, carga y descarga de materiales de cambio de fase.

Se muestra en la Figura 68 como se produce la descarga del material RT25, RT25hc y RT28hc solo cuando las temperaturas están por debajo de cierto nivel de temperatura en comparación al modelo sin PCM, este comportamiento se explica según lo que se analiza en el capítulo 7.2. En particular se ve como el RT25, RT25HC y RT28 no se descargan en el tercer y sexto día de la semana. Este efecto se explica en la sección de Modelo Numérico, Cambio de Fase.

Analizando las distintas orientaciones mostradas se puede apreciar de los resultados que para las ciudades ubicadas en el hemisferio sur (Santiago, Concepción y Copiapó) durante la semana representativa de invierno las mayores temperaturas se obtuvieron con la ventana orientada hacia el norte y para la semana representativa de verano las mayores temperaturas se obtuvieron hacia la orientación poniente. Para el caso de las ciudades ubicadas en el hemisferio norte (Boulder, El Paso y Vancouver) durante la semana representativa de invierno las mayores temperaturas se obtuvieron con la ventana orientada hacia el sur y para la semana representativa de verano las mayores temperaturas se obtuvieron hacia la orientación poniente. Este efecto se debe al posicionamiento del sol durante las fechas de invierno y verano, en invierno la trayectoria del sol en nuestro cielo tiene un recorrido más bajo, por lo que llega de forma más directa la radiación del sol cuando este está en su posición más alta, lo cual ocurre cuando se encuentra hacia el norte en caso de ser hemisferio sur o hacia el sur en caso de ser hemisferio norte. Por otra parte, durante el verano el recorrido del sol en nuestro cielo tiene una trayectoria de mayor altura o dicho de otra forma pasa más cerca del cenit, por lo que llega la radiación solar de forma mayor en las horas iniciales y finales del día, coincidiendo estas con las orientaciones oriente y poniente, además vemos que por una acumulación de calor durante el día la ventana está más caliente hacia el final del día, es decir cuando está en la orientación poniente.

En cuanto a los resultados obtenidos para los materiales RT31 y RT35 se produce siempre la carga y descarga del material, incluso si se está en la semana de verano, dado que estos materiales tienen una temperatura de activación mayor hay casos para los cuales no llegan a activarse, como por ejemplo en Vancouver (Figura 49 a Figura 52) donde las temperaturas no pasan de los 30°C aproximadamente. Por otra parte, en el caso de El Paso, específicamente en las semanas de verano (Figura 58 y Figura 60) se ve claramente como se produce la activación del material en el periodo del día donde se presentan las temperaturas más altas. Tomando este mismo caso se ve que para el RT25 y RT25hc no se produce descarga del material y además se elevan las temperaturas de estos materiales llegando incluso a equipararse con las temperaturas del modelo sin PCM, lo que ocurre es que al igual que en el caso del RT12 se produce un agotamiento de la capacidad de almacenamiento de energía del RT25 y RT25hc.

En lo que respecta al PMV, los resultados que se obtienen para las temperaturas superficiales de la ventana están directamente relacionados con el índice PMV. Existen variables en el cálculo del PMV que se relacionan con las características particulares de un espacio de oficina y otras como el calor radiante que se relacionan a las temperaturas de las superficies que conforman el espacio de oficina, en particular la ventana modelada, por lo tanto, al reducir las temperaturas se logra una reducción en el PMV que dadas las condiciones ambientales de los casos mostrados se traduce en una mejora del confort térmico. Además, se debe considerar que la reducción en el PMV implica una reducción en la carga por enfriamiento que se tendría en el caso de no contar con el PCM en la ventana.

11 Conclusiones

Se presentan conclusiones en base a los resultados obtenidos para la implementación de un modelo computacional de transferencia de calor para una ventana doble (doble vidrio) con una cavidad rellena con PCM. Se evalúan los resultados obtenidos y se compara con un modelo de ventana sin PCM para ver el efecto causado por la incorporación de PCM al modelo de la ventana.

Con respecto a la reducción de los peaks de temperatura en la superficie de la ventana modelada, se concluye a partir de los resultados obtenidos que, para la mayoría de los casos, el incorporar PCM a muros ventana reduce los peaks de temperatura interior de la ventana. Teniendo en cuenta que se quiere dar un enfoque a oficinas es una mejora considerable ya que dichos peaks de temperatura se dan en horas de trabajo, por lo tanto, afectan de forma directa en el confort térmico de los ocupantes. Además, se reduce el consumo de energía para enfriamiento, dado que al haber una reducción en los peaks de temperatura se necesitará de menos tiempo de aire acondicionado para mantener el aire en un rango de confort térmico.

Con respecto al análisis de confort térmico evaluado mediante el índice PMV, se observa una mejora en el confort térmico al usar PCM en ventanas. En concreto se reducen los valores de PMV desde número mayor que 1 ($1 < \text{PMV} < 2$ corresponde a un rango de confort térmico que se sitúa entre un estado ligeramente caluroso y caluroso) a menores que 1 ($0 < \text{PMV} < 1$ corresponde a un rango de confort térmico que se sitúa entre un estado ligeramente caluroso y neutro), al incorporar el PCM al modelo de ventana se mejora el confort térmico percibido en el espacio de oficina, traduciendo esto al índice PMV se tiene que se está más cerca de un estado neutro ($\text{PMV}=0$) que se considera como óptimo.

El trabajo de titulación realizado entrega resultados que ayudan a comprender el comportamiento térmico de ventanas con PCM bajo condiciones no estudiadas con anterioridad como es el caso de las ciudades de Chile tales como, Santiago, Concepción y Copiapó, por lo que este trabajo de titulación aporta información útil sobre el desempeño del PCM en caso de querer darle un uso comercial en caso de querer ahondar en investigación académica sobre los materiales de cambio de fase en el área de la construcción en Chile. Además, el presente trabajo es un aporte en cuanto a la continuación de la investigación sobre los materiales de cambio de fase utilizados como materiales de construcción, teniendo en cuenta que no existen a la fecha softwares de modelación energética que implementen de forma efectiva el comportamiento de materiales de cambio de fase a ventanas, el modelo desarrollado en este trabajo permite avanzar en la modelación de PCM en ventanas. Es también un punto de partida para la complementación con otros programas computacionales como como MLE+ que permiten acoplar modelos desarrollados en Matlab, como el modelo de transferencia de calor para ventanas con PCM realizado en este trabajo de titulación, y softwares de modelación energética como EnergyPlus, es de esperar que el acoplamiento de estos softwares entregue resultados muy interesantes en cuanto a modelación de los fenómenos descritos anteriormente.

Se visualiza como un trabajo a futuro la validación del modelo desarrollado por medio de experimentación con materiales de cambio de fase. Es necesario verificar los supuestos hechos y complementar el trabajo realizado con resultados experimentales.

En resumen, se muestra que existen materiales que bajo ciertas condiciones no reducen los peaks de temperatura, como por ejemplo el RT12 en todos los casos probados no reduce las temperaturas debido a que no cambia de fase, como se ha mostrado en los resultados la temperatura de activación del RT12 está por debajo de las temperaturas que se obtuvieron para el modelo de ventana, lo cual produjo un estado permanente de carga del material, en otras palabras el material estuvo la mayor parte del tiempo en estado líquido y sin capacidad de almacenar energía. Para los PCM RT25, RT25hc y RT28hc en el caso de El Paso en las semanas de verano se produce el mismo fenómeno que se describe para el RT12, por lo tanto, en el caso del Paso se hace necesario complementar el uso de PCM en ventanas con otro mecanismo de protección solar para evitar estos problemas y para el caso del RT12 se debe considerar usar PCM con temperaturas de activación mayor que estén cercanas a temperaturas de confort térmico. Para los RT31 y RT35 se produce la carga y descarga del material para la gran mayoría de los casos, sin embargo, al tener una temperatura de activación mayor se obtienen temperaturas mayores que en otros PCM.

Teniendo todo esto en cuenta se puede concluir que el PCM con mejor rendimiento en la gran mayoría de los casos es el RT25 y RT25hc. La diferencia de calor latente entre estos dos materiales no produjo cambios significativos entre los resultados de estos dos materiales. Un material con una temperatura de activación más cercana a temperaturas de confort térmico (entre 21°C y 26°C) probablemente tendrá mejores resultados al evaluar el confort térmico.

En concreto, la implementación del modelo de transferencia de calor para ventanas ubicadas en espacios de oficinas, que poseen PCM, muestra que se produce una reducción considerable en los peaks de temperatura, lo cual mejora el confort térmico y reduce el uso de energía para enfriamiento del espacio de oficina.

12 Bibliografía

- Francesco Goiaa, b., M. Perinoa, and M. Haaseb, 2012, A numerical model to evaluate the thermal behaviour of PCM glazing system configurations, v. 54, p. 141–153.
- García Santos, A., F. J. Neila Gonzalez, and A. Oliver, 2012, Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica: *Materiales de Construcción*, ISSN 0465-2746 - eISSN: 1988-3226, 2012-01, Vol. 62, No. 305, v. 62.
- Goia, F., M. Perino, and V. Serra, 2013, Improving thermal comfort conditions by means of PCM glazing systems: *Energy and Buildings*, v. 60, p. 442-452.
- Goia, F., M. Zinzi, E. Carnielo, and V. Serra, 2015, Spectral and angular solar properties of a PCM-filled double glazing unit: *Energy and Buildings*, v. 87, p. 302-312.
- Guillory, J. K., 2009, Book Review of *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 90th Edition, American Chemical Society.
- Jin, X., H. Hu, X. Shi, X. Zhou, and X. Zhang, 2018, Comparison of two numerical heat transfer models for phase change material board: *Applied Thermal Engineering*, v. 128, p. 1331-1339.
- Li, S., G. Sun, K. Zou, and X. Zhang, 2016, Experimental research on the dynamic thermal performance of a novel triple-pane building window filled with PCM, v. 27, p. 15–22.
- Li, S., K. Zhong, Y. Zhou, and X. Zhang, 2014, Comparative study on the dynamic heat transfer characteristics of PCM-filled glass window and hollow glass window, v. 85, p. 483–492.
- Liu, C., Y. Zheng, D. Li, H. Qi, and X. Liu, 2016a, A Model to Determine Thermal Performance of a Non-ventilated Double Glazing Unit with PCM and Experimental Validation: *Procedia Engineering*, v. 157, p. 293-300.
- Liu, C., Y. Zhou, D. Li, F. Meng, Y. Zheng, and X. Liu, 2016b, Numerical analysis on thermal performance of a PCM-filled double glazing roof: *Energy and Buildings*, v. 125, p. 267-275.
- Serway, R. A., 2015, *Física para ciencias e ingeniería: México*, D. F., México, D. F. : Cengage Learning.
- Tabares-Velasco, P. C., C. Christensen, and M. Bianchi, 2012, Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies - *ScienceDirect*.
- Zhong, K., S. Li, G. Sun, S. Li, and X. Zhang, 2015, Simulation study on dynamic heat transfer performance of PCM-filled glass window with different thermophysical parameters of phase change material, v. 106, p. 87–95.

A. Anexo

Para correr la simulación en Matlab es necesario cargar datos climáticos de temperaturas y radiaciones desde EnergyPlus, con nombres específicos para cada caso, especificando ciudad, orientación de la ventana y tipo de material.

Se desarrollaron dos scripts principales para correr el modelo y otros tres que sirven como complemento:

Tabla 18: descripción de Script de Matlab desarrollados para este trabajo de titulación.

Nombre Script	Descripción
AIRv_15.m	Modela ecuación del calor por diferencias finitas para obtener perfil de temperaturas de un doble panel de vidrio con una cavidad interior de aire.
PCMV8.m	Modela ecuación del calor por diferencias finitas para obtener perfil de temperaturas de un doble panel de vidrio con una cavidad interior de PCM.
entlPCMV2.m	Calcula Calor específico en base a datos de entalpía y temperatura.
interpDATOSv6.m	Interpola datos extraídos de EnergyPlus para tener datos por cada minuto.
PMV.m	Calcula índice PMV para oficina mediana con un punto de medición a una distancia de 1m del muro ventana y una altitud de 1,37m desde el suelo.

A continuación, se adjuntan los Scripts mencionados anteriormente.

A.1 AIRv_15.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function y = AIRv15(fecha1, fecha2, orntn, ciudad)
% Transferencia de calor, ventana
% modelo vidrio + aire + vidrio

%Specific Heat Aire (J/kg K)=1012 [Cp]
%Thermal Conductivity Aire (W/m K)=0,024 [k]
%Density Aire (kg/m3)=1.2 [den]
%Specific Heat Window (J/kg K)=840 [Cp]
%Thermal Conductivity Window (W/m K)=0,96 [k]
%Density Window (kg/m3)=2500 [den]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

x1=fecha1;
x2=fecha2;
orientacion=orntn;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

MUU=[];

```

```

uue=[];
uui=[];

%% Datos externos, se leen desde excel

%verano est=0;
%invierno est=1;
est=1;

Isol=[];
hrs=[];
hra=[];
hrg=[];
Tae=[];
Tse=[];
Tai=[];
Tsi=[];
Tsky=[];
v=[];

[Isol hrs hra hrg Tae Tse Tai Tsi Tsky
v]=interpDATOSv6(x1,x2,orientacion,ciudad);

%irradiancia [W/m2]
%Isol

%coeficiente radiacion sky [W/(m2*K)]
%hrs

%coeficiente radiacion air [W/(m2*K)]
%hra

%coeficiente radiacion ground [W/(m2*K)]
%hrg

%temperatura aire, exterior[K]
%Tae

%temperatura superficial exterior[K]
%Tse

%temperatura aire, interior[K]
%Tai

%temperatura superficial interior[K]
%Tsi

%temperatura cielo[K]
%Tsky

%velocidad viento [m/s]
%v

%% Coeficiente conducción

```

```

%hce=max(1.52*abs(Tae(1)-Tse(1))^(1/3),5.62+3.9*v(1))/100;

hce=22;%W/(m^2*K)

%hci=((1.5*(abs(Tai(1)-Tsi(1))/60)^0.25)^6+(1.23*(abs(Tai(1)-
Tsi(1))^(1/3))^6);
hci=9;%W/(m^2*K)    default 3.076

%% Propiedades material
%al=10000*k/(Cp*den); %difusividad térmica al=k/(rho*Cp) [cm2/s], Cp es
variable.

%conductividad termica del aire [W/(m K)]
kAIR=0.024;

%densidad del aire [Kg/m3]
denAIR=1.2;

%calor especifico aire[J/(Kg K)]
CpAIR=1012;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%conductividad termica del vidrio [W/(m K)]
kG=0.96;

%densidad del vidrio [Kg/m3]
denG=2500;

%calor especifico vidrio [J/(Kg K)]
CpG=840;

%kAIR=kG;denAIR=denG;CpAIR=CpG;
%% Constantes

% Stefan-Boltzmann
sig=5.67*10^-8;%[W/(m^2 * K^4)]

%emisividad del vidrio
eps=0.88;% adimensional

%% Propiedades Lumínicas AIRE y vidrio(W), absortancia y transmitancia

aAIR=0.01;% adimensional
tAIR=0.98;% adimensional
aG=0.154;% adimensional
tG=0.775;% adimensional

%% Difusividad Térmica PCM, Vidrio

% [m2/s]=[W/(m K)]/([J/(Kg K)]*[Kg/m3]) ,    [W]=[J/s]

%difusividad termica aire
alAIR=kAIR/(CpAIR*denAIR);% [m2/s]

```

```

%difusividad termica vidrio
alG=kG/ (CpG*denG);% [m2/s]

%% Discretizacion espacial y temporal

%En EnergyPlus se definen los time step por hora, ej: time step=60 ->
%60hr*60min/60=60seg -> paso de tiempo=60

%paso de tiempo
ht=60; %[s]

%space discretization constant
c=2;

%paso espacial
hx=sqrt(c*alG*ht);% [m2]

espesorVidrio=0.006;% [m]
espesorGap=0.018;% [m]

espesorTotal= 2*espesorVidrio + espesorGap;% [m]

%% Intervalo espacial y temporal

x0=0; xL=espesorTotal;% [cm]      doble panel, paneles de vidrio de 0,6cm e
interior de 0,12cm

t0=0; tf=length(Isol);%[hr]      EnergyPlus entrega datos por hora

cn=floor(espesorTotal/hx);% cantidad de nodos

x=linspace(x0,xL,cn+1); % vector de nodos

%% Condiciones iniciales

%[un] es el vector de temperaturas del "paso previo". Para el primer paso de
%la iteracion se define de forma arbitraria, luego se va actualizando con
%las temperaturas calculadas en cada paso de la iteracion

for i = 1:cn+1;
un(i) = 20+273;%[K]
end

%% Valores en la frontera, f0 y fL representan valores de condicion de borde,
ya sea u(t) o du(t), la diferencia entre usar C.B Neuman o Dirchlet radica en
la matriz A

q1=(Tsky(1)*hrs(1)+(hra(1)+hrg(1)+hce)*Tae(1)) /
((kG/hx)+(hrs(1)+hra(1)+hrg(1)+hce)); %[K] borde externo ventana
q2=(hci*Tai(1)-eps*sig*(un(end)^4-Tai(1)^4))* (hx)/(kG+(hx)*hci); %[K] borde
interno ventana

f0(1)=q1; fL(1)=q2;%factor derivado de la condicion de borde en "paso
anterior" ht = n

```

```

f0(2)=q1; fL(2)=q2;%factor derivado de la condicion de borde en "paso actual"
ht = n+1

%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ITERACION PRINCIPAL %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for j=2:1:tf
%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Iteracion secundaria: se realiza una segunda iteracion para resolver el
%problema de no linealidad en la condicion de borde exterior, en donde hay
%una incognita elevado a 4, para resolver esto se define un coeficiente "ci"
%y se calculan las temperaturas hasta cumplir con un criterio de
%convergencia, esta iteracion es hace en cada paso de tiempo.

uold=un(end);
unew=uold+0.3;
contador=0;

while abs(uold-unew)>0.2

    if contador>100
        break
    end

    uold=unew;
    ci=eps*sig*uold^3;

% Coeficiente de conveccion externa, calculado por TARP

%   hnatural=12.49*4.065*v(j)+0.028*v(j)^2;
%   hforzado=2.537*0.5*1.67*sqrt(12*v(j)/6);
%   hce=hnatural+hforzado;

% Condiciones de borde, se actualiza el valor en cada iteracion

    q1=(Tsky(j)*hrs(j)+(hra(j)+hrg(j)+hce)*Tae(j)) /
((kG/hx)+(hrs(j)+hra(j)+hrg(j)+hce));% [K]
    q2=(hci*Tai(j)+eps*sig*Tai(j)^4)/((kG/hx)+ci+hci);% [K]

    f0(2)=q1; fL(2)=q2;

% Difusividad Térmica PCM, Vidrio

%difusividad termica aire
    alAIR=kAIR/(CpAIR*denAIR);% [m2/s]

```

```

%difusividad termica vidrio
alG=kG/ (CpG*denG);% [m2/s]

%% Matriz A y vector b del algoritmo
%las matrices A, Aa, b tienen que ver con el metodo de diferencias de
%CrankNicolson

A =zeros (cn+1); b=zeros (cn+1,1);

%matriz A
for i = 1:cn;
    A(i,i)= -2; A(i,i+1)= 1; A(i+1,i)=1;
end
A(end,end)=-2;

%modificaciones en matriz A debido a condiciones de borde
A(1,1)=-2+( 1 / ( 1 + (hrs(j)+hra(j)+hrg(j)+hce) * (hx/kG) ) );
A(end,end)=-2+(kG/(kG+hci*(hx)+hx*ci));

%% Coeficiente r y matriz Aa

%Se multiplica el factor r a la matriz A de forma separada, se obtiene de esta
multiplicacion la matriz Aa

%r es un factor que posee las propiedades del material, se calcula como:
% r=(conductividad termica)/(densidad x calor especifico) * (1/2) * (paso
temporal/(paso espacial)^2)
% r=(al*ht/hx^2)/2, al=k/(Cp*den), es adimencional

r=zeros (1,cn+1);%vector horizontal
Aa=zeros (cn+1);

% Segun la distribucion del material en la ventana (nodos vidrio y nodos
% aire/PCM) se tiene que el primer y ultimo nodo corresponden a vidrio y 3
% nodos interiores corresponden a aire/PCM, por lo tanto el vector r se
% define de la siguiente manera:

% nodo vidrio externo
r(1)=(alG*ht/hx^2)/2;

% nodos interiores
for i=2:4
    r(i)=(alAIR*ht/hx^2)/2;
end

% nodo vidrio interno
r(5)=(alG*ht/hx^2)/2;

```

```
%Se multiplica el vector r a la matriz A para incluir características del
%material al sistema de ecuaciones:
```

```
for i=1:cn+1
    Aa(:,i)=A(:,i).*r(i);% (:,i) multiplica por columnas
end

Aa=Aa';
```

```
%% Componente de radiacion y conveccion de la transferencia de calor (phi)
```

```
phi=zeros(1,cn+1);

phi(1)=aG*Isol(j)/(hx);%W/m3

for i=2:4
    phi(i)=aAIR*tG*Isol(j)/(hx);%W/m3
end

phi(5)=aG*tG*tAIR*Isol(j)/(hx);%W/m3
```

```
phii(1)=phi(1).*ht/(denG*CpG);%K

for i=2:4
    phii(i)=phi(i).*ht/(denAIR*CpAIR);%K
end

phii(5)=phi(5).*ht/(denG*CpG);%K
```

```
% Condiciones para hacer nula la radiacion y convección
```

```
%f0(1)=0;f0(2)=0;fL(1)=0;fL(2)=0;
%phii=zeros(1,cn+1);
```

```
%% Se calcula la solución
```

```
%Mu es el vector que contiene el perfil de temperaturas obtenidos por
%diferencias finitas (CrankNicolson)
```

```
b(1) = (f0(2) + f0(1));
b(end) = (fL(2) + fL(1));
MU = (inv(eye(cn+1)-Aa)*((eye(cn+1)+Aa)*un' + r'.*b)) + (inv(eye(cn+1)-
Aa)*phii');
```

```
%% Se guardan datos para el siguiente paso
```

```

un=MU';
ue=(MU(1) * (1/(1+(hrs(j)+hra(j)+hrG(j)+hce)*hx/kG)) + q1);%

% solo para invierno factor de carga +5%: remplazar el 1.00*q2 por 1.05*q2
if est==0
ui=(1*MU(end)*kG/(kG+hci*hx+ci*hx) + 1.00*q2);
elseif est==1
ui=(1*MU(end)*kG/(kG+hci*hx+ci*hx) + 1.05*q2);
end

unew=ui;

contador=contador+1;
end

f0(1)=f0(2);
fL(1)=fL(2);
MUU=[MUU MU];
uui=[uui ui];
uee=[uee ue];

end

%% Gráfico

%figure(1)
%surf(MUU)
%xlabel('tiempo [hr]')
%ylabel('ancho ventana [cm] (en 0 esta el exterior, en 1.2 el interior)')
%zlabel('temperatura [K]')
%title('Perfiles de Temperatura a lo Ancho de la Ventana, visto a lo largo del
tiempo')

%figure(2)
%plot(1:tf,Tse)
%hold on
%plot(2:tf,uee,'r')
%xlabel('tiempo [hr]')
%ylabel('temperatura [K]')
%title('Temperatura borde exterior Ventana')
%legend('E+', 'Script Matlab')

%figure(3)
%plot(1:tf,Tsi)
%hold on
%plot(2:tf,uui,'r')
%xlabel('tiempo [hr]')
%ylabel('temperatura [K]')
%title('Temperatura borde interior ventana')
%legend('E+', 'Script Matlab')

y=[uee;MUU;uui];
end

```

A.2 PCMV8.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function y = PCMV8 (fecha1, fecha2, orntn, ciudad, Cl, Tf)
% Transferencia de calor, ventana
% modelo vidrio + PCM + vidrio

%Specific Heat PCM (J/kg K)=2500 [Cp]
%Thermal Conductivity PCM (W/m K)=0.16 [k]
%Density PCM (kg/m3)=850 [den]
%Specific Heat Window (J/kg K)=840 [Cp]
%Thermal Conductivity Window (W/m K)=0,96 [k]
%Density Window (kg/m3)=2500 [den]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

x1=fecha1;
x2=fecha2;
orientacion=orntn;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

MUU=[];
uee=[];
uui=[];

%% Datos externos, se leen desde excel

%verano est=0;
%invierno est=1;
est=1;

Isol=[];
hrs=[];
hra=[];
hrg=[];
Tae=[];
Tse=[];
Tai=[];
Tsi=[];
Tsky=[];
v=[];

[Isol hrs hra hrg Tae Tse Tai Tsi Tsky
v]=interpDATOSv6 (x1,x2,orientacion,ciudad);

%irradiancia [W/m2]
%Isol

%coeficiente radiacion sky [W/(m2*K)]
%hrs

%coeficiente radiacion air [W/(m2*K)]
%hra

%coeficiente radiacion ground [W/(m2*K)]
```

```

%hrq

%temperatura aire, exterior[K]
%Tae

%temperatura superficial exterior[K]
%Tse

%temperatura aire, interior[K]
%Tai

%temperatura superficial interior[K]
%Tsi

%temperatura cielo[K]
%Tsky

%velocidad viento [m/s]
%v

%% Coeficiente conducción

%hce=max(1.52*abs(Tae(1)-Tse(1))^(1/3),5.62+3.9*v(1))/100;

hce=22;%W/(m^2*K)

%hci=((1.5*(abs(Tai(1)-Tsi(1))/60)^0.25)^6+(1.23*(abs(Tai(1)-
Tsi(1)))^(1/3))^6);
hci=9;%W/(m^2*K)    default 3.076

%% Propiedades material
%al=10000*k/(Cp*den); %difusividad térmica al=k/(rho*Cp)) [cm2/s], Cp es
variable.

%conductividad termica del aire [W/(m K)]
kPCM=0.16;

%densidad del aire [Kg/m3]
denPCM=850;

%calor especifico aire[J/(Kg K)]
CpPCM=2000;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%conductividad termica del vidrio [W/(m K)]
kG=0.96;

%densidad del vidrio [Kg/m3]
denG=2500;

%calor especifico vidrio [J/(Kg K)]
CpG=840;

%kAIR=kG;denAIR=denG;CpAIR=CpG;
%% Constantes

```

```

% Stefan-Boltzmann
sig=5.67*10^-8;%[W/(m^2 * K^4)]

%emisividad del vidrio
eps=0.88;% adimencional

%% Difusividad Térmica PCM, Vidrio

% [m2/s]=[W/(m K)]/([J/(Kg K)]*[Kg/m3]) , [W]=[J/s]

%difusividad termica aire
alPCM=kPCM/(CpPCM*denPCM);% [m2/s]

%difusividad termica vidrio
alG=kG/(CpG*denG);% [m2/s]

%% Discretizacion espacial y temporal

%En EnergyPlus se definen los time step por hora, ej: time step=60 ->
%60hr*60min/60=60seg -> paso de tiempo=60

%paso de tiempo
ht=60;%[s]

%space discretization constant
c=2;

%paso espacial
hx=sqrt(c*alG*ht);% [m2]

espesorVidrio=0.006;% [m]
espesorGap=0.018;% [m]

espesorTotal= 2*espesorVidrio + espesorGap;% [m]

%% Intervalo espacial y temporal

x0=0; xL=espesorTotal;% [cm]      doble panel, paneles de vidrio de 0,6cm e
interior de 0,12cm

t0=0; tf=length(Isol);%[hr]      EnergyPlus entrega datos por hora

cn=floor(espesorTotal/hx);% cantidad de nodos

x=linspace(x0,xL,cn+1); % vector de nodos

%% Condiciones iniciales

%[un] es el vector de temperaturas del "paso previo". Para el primer paso de
%la iteracion se define de forma arbitraria, luego se va actualizando con
%las temperaturas calculadas en cada paso de la iteracion

for i = 1:cn+1;
un(i) = 20+273;%[K]

```

```

end

%% Valores en la frontera, f0 y fL representan valores de condicion de borde,
ya sea u(t) o du(t), la diferencia entre usar C.B Neuman o Dirchlet radica en
la matriz A

q1=(Tsky(1)*hrs(1)+(hra(1)+hrg(1)+hce)*Tae(1)) /
((kG/hx)+(hrs(1)+hra(1)+hrg(1)+hce)); %[K] borde externo ventana
q2=(hci*Tai(1)-eps*sig*(un(end)^4-Tai(1)^4))*(hx)/(kG+(hx)*hci); %[K] borde
interno ventana

f0(1)=q1; fL(1)=q2;%factor derivado de la condicion de borde en "paso
anterior" ht = n
f0(2)=q1; fL(2)=q2;%factor derivado de la condicion de borde en "paso actual"
ht = n+1

%% paso previo para calculo de Cp
T1=18;%temperatura media paso anterior, para la primera iteracion se dan estos
valores de T1 y h1, pero en los siguientes pasos se deben ir recalculando

%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ITERACION PRINCIPAL %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for j=2:1:tf
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% Iteracion secundaria: se realiza una segunda iteracion para resolver el
%%problema de no linealidad en la condicion de borde exterior, en donde hay
%%una incognita elevado a 4, para resolver esto se define un coefiente "ci"
%%y se calculan las temperatuas hasta cumplir con un criterio de
%%convergencia, esta iteracion es hace en cada paso de tiempo.

uold=un(end);
unew=uold+0.3;
contador=0;

while abs(uold-unew)>0.2

    if contador>100
        break
    end

    uold=unew;
    ci=eps*sig*uold^3;

%% Coeficiente de conveccion externa, calculado por TARP

%    hnatural=12.49*4.065*v(j)+0.028*v(j)^2;
%    hforzado=2.537*0.5*1.67*sqrt(12*v(j)/6);
%    hce=hnatural+hforzado;

```

```

%% Condiciones de borde, se actualiza el valor en cada iteracion

    q1=(Tsky(j)*hrs(j)+(hra(j)+hrg(j)+hce)*Tae(j)) /
    ((kG/hx)+(hrs(j)+hra(j)+hrg(j)+hce));% [K]
    q2=(hci*Tai(j)+eps*sig*Tai(j)^4)/((kG/hx)+ci+hci);% [K]

    f0(2)=q1; fL(2)=q2;

%% Calor especifico Cp
T2=un(3)-273.15;

CpPCM=ent1PCMv2(T1,T2,C1,Tf); %Las temperaturas que se ingresan a esta
funcion deben estar en [°C]

if CpPCM<=1250
    CpPCM=1250;
end
%% Difusividad Térmica PCM, Vidrio

%difusividad termica aire
alPCM=kPCM/(CpPCM*denPCM);% [m2/s]

%difusividad termica vidrio
alG=kG/(CpG*denG);% [m2/s]

%% Propiedades Lumínicas AIRE y vidrio(W), absortancia y transmitancia
aPCM1=0.75;% l:líquido
tPCM1=0.17;
aPCMs=0.27;% s:sólido
tPCMs=0.46;
if Tf==12;%%%%%%%%%%%%%% Xsc haslog casan tok
    Tf=6;
end
if mean(un(2:4))<=(Tf+273.15)%condicion para PCM en estado solido
    aPCM=aPCMs;
    tPCM=tPCMs;

else
    aPCM=aPCM1;
    tPCM=tPCM1;
end

aG=0.154;% adimensional
tG=0.775;% adimensional

%% Matriz A y vector b del algoritmo
%las matrices A, Aa, b tienen que ver con el metodo de diferencias de
%CrankNicolson

    A =zeros(cn+1); b=zeros(cn+1,1);

%matriz A
for i = 1:cn;
    A(i,i)= -2; A(i,i+1)= 1; A(i+1,i)=1;

```

```

end
A(end,end)=-2;

%modificaciones en matriz A debido a condiciones de borde
A(1,1)=-2+( 1 / ( 1 + (hrs(j)+hra(j)+hrj(j)+hce) * (hx/kG) ) );
A(end,end)=-2+(kG/(kG+hci*(hx)+hx*ci));

%% Coeficiente r y matriz Aa

%Se multiplica el factor r a la matriz A de forma separada, se obtiene de esta
multiplicacion la matriz Aa

%r es un factor que posee las propiedades del material, se calcula como:
% r=(conductividad termica)/(densidad x calor especifico) * (1/2) * (paso
temporal/(paso espacial)^2)
% r=(al*ht/hx^2)/2, al=k/(Cp*den), es adimensional

    r=zeros(1,cn+1);%vector horizontal
    Aa=zeros(cn+1);

% Segun la distribucion del material en la ventana (nodos vidrio y nodos
% aire/PCM) se tiene que el primer y ultimo nodo corresponden a vidrio y 3
% nodos interiores corresponden a aire/PCM, por lo tanto el vector r se
% define de la siguiente manera:

% nodo vidrio externo
    r(1)=(alG*ht/hx^2)/2;

% nodos interiores
    for i=2:4
        r(i)=(alPCM*ht/hx^2)/2;
    end

% nodo vidrio interno
    r(5)=(alG*ht/hx^2)/2;

%Se multiplica el vector r a la matriz A para incluir características del
%material al sistema de ecuaciones:

    for i=1:cn+1
        Aa(:,i)=A(:,i).*r(i);% (:,i) multiplica por columnas
    end

    Aa=Aa';

%% Componente de radiacion y conveccion de la transferencia de calor (phi)

    phi=zeros(1,cn+1);

```

```

phi(1)=aG*Isol(j)/(hx);%W/m3

phi(2)=tG*aPCM*Isol(j)/(3*hx);%W/m3

phi(3)=tG*tPCM*aPCM*Isol(j)/(3*hx);%W/m3

phi(4)=tG*tPCM*tPCM*aPCM*Isol(j)/(3*hx);%W/m3

phi(5)=tG*tPCM*tPCM*tPCM*aG*Isol(j)/(hx);%W/m3

%transformacion a grados kelvin

phii(1)=phi(1).*ht/(denG*CpG);%K

for i=2:4
    phii(i)=phi(i).*ht/(denPCM*CpPCM);%K
end

phii(5)=phi(5).*ht/(denG*CpG);%K

% Condiciones para hacer nula la radiacion y convección
%f0(1)=0;f0(2)=0;fL(1)=0;fL(2)=0;
%phii=zeros(1,cn+1);

%% Se calcula la solución
%Mu es el vector que contiene el perfil de temperaturas obtenidos por
%diferencias finitas (CrankNicolson)

b(1) = (f0(2) + f0(1));
b(end) = (fL(2) + fL(1));
MU = (inv(eye(cn+1)-Aa)*(eye(cn+1)+Aa)*un' + r'.*b) + (inv(eye(cn+1)-
Aa)*phii');

%% Se guardan datos para el siguiente paso

un=MU';
ue=(MU(1) * (1/(1+(hrs(j)+hra(j)+hrg(j)+hce)*hx/kG)) + q1);%

% solo para invierno factor de carga +5%: remplazar el 1.00*q2 por 1.05*q2
if est==0
ui=(1*MU(end)*kG/(kG+hci*hx+ci*hx) + 1.00*q2);
elseif est==1
ui=(1*MU(end)*kG/(kG+hci*hx+ci*hx) + 1.05*q2);
end

unew=ui;

contador=contador+1;
end

```

```

f0(1)=f0(2);
fL(1)=fL(2);
MUU=[MUU MU];
uui=[uui ui];
uee=[uee ue];
T1=T2;

end

%% Gráfico

%figure(1)
%surf(MUU)
%xlabel('tiempo [hr]')
%ylabel('ancho ventana [cm] (en 0 esta el exterior, en 1.2 el interior)')
%zlabel('temperatura [K]')
%title('Perfiles de Temperatura a lo Ancho de la Ventana, visto a lo largo del
tiempo')

%figure(2)
%plot(1:tf,Tse)
%hold on
%plot(301:tf,uee(300:end),'r')
%xlabel('tiempo [hr]')
%ylabel('temperatura [K]')
%title('Temperatura borde exterior Ventana')
%legend('E+','Script Matlab')

%figure(3)
%plot(1:tf,Tsi)
%hold on
%plot(301:tf,uui(300:end),'r')
%xlabel('tiempo [hr]')
%ylabel('temperatura [K]')
%title('Temperatura borde interior ventana')
%legend('E+','Script Matlab')

y=[uee;MUU;uui];
end

```

A.3 entlPCMV2.m

```
function y = entlPCMV2(T1,T2,CalorLatente,TemperaturaFusion)

%% T1 y T2 corresponde a las temperaturas en el paso de tiempo 1 y el paso
%de tiempo 2, respectivamente (en Kelvin)

%% El grafico de entalpía esta compuesto por 3 curvas, la primera seccion
%corresponde a el estado sólido, la segunda seccion corresponde a la
%transición y la tercera seccion al estado liquido.

Cl=CalorLatente; %[J/Kg]
Tf=TemperaturaFusion; %[K]

%Cada una de estas tres curvas se pueden describir por medio de cuatro
%puntos.

%Primera Curva

h1=0;
t1=-20;

t2=Tf;% El ultimo punto de la primera curva(o primer punto de la segunda
%curva) corresponde a la temperatura de fusión del material, este dato se debe
ingresar en [°C]
h2=60000;

h3=h2+Cl;
t3=t2+1;

h4=h3+(h2-h1);
t4=t3+(t2-t1);

%% Pendiente curva 1

m1=(h2-h1)/(t2-t1);

%% Pendiente curva 2

m2=(h3-h2)/(t3-t2);

%% Pendiente curva 3

m3=(h4-h3)/(t4-t3);

%% Entalpía, Temperatura en el paso de tiempo 1 (E1,T1)

if T1<t1
    E1=h1;

elseif T1>=t1 && T1<=t2
    E1=h1+m1*(T1-t1);

elseif T1>t2 && T1<=t3
    E1=h2+m2*(T1-t2);
```

```

elseif T1>t3 && T1<=t4
    E1=h3+m3*(T1-t3);

else
    E1=h4;
end

%% Entalpía, Temperatura en el paso de tiempo 2 (E2,T2)

if T2<t1
    E2=h1;

elseif T2>=t1 && T2<=t2
    E2=h1+m1*(T2-t1);

elseif T2>t2 && T2<=t3
    E2=h2+m2*(T2-t2);

elseif T2>t3 && T2<=t4
    E2=h3+m3*(T2-t3);

else
    E2=h4;
end

%% Calor Específico Cp

Cp=(E2-E1)/(T2-T1);

    y=Cp;
end

```

A.4 interpDATOSv6.m

```
function [r1,r2,r3,r4,r5,r6,r7,r8,r9,r10] = interpDATOSv6(x1,x2,o,ciudad)
```

```
%verano
%f=0;
%invierno
%f=1;
num=61;%nuevro de valores que se agregan en interpolacion

norte='NORTH';
sur='SOUTH';
este='EAST';
oeste='WEST';

%ciudad='';

csv='.csv';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if strcmp(o,'n')==1
data=importdata([norte ciudad csv]);

%inicio
i=1;
for i=1:length(data.textdata(:,1))
    if strcmp(data.textdata(i,1),x1)==1
        break
    end
end

%termino
j=1;
for j=1:length(data.textdata(:,1))
    if strcmp(data.textdata(j,1),x2)==1
        break
    end
end

%% Elegir columnas de datos que se utilizaran

%Tae
k1=1;
while strcmp(data.textdata(1,k1),'Environment:Site Outdoor Air Drybulb
Temperature [C] (Hourly)')==1
k1=k1+1;
end

%v
k2=1;
while strcmp(data.textdata(1,k2),'Environment:Site Wind Speed
[m/s] (Hourly)')==1
k2=k2+1;
end

%Ts
```

```

k3=1;
while strcmp(data.textdata(1,k3),'Environment:Site Sky Temperature
[C] (Hourly)')==1
k3=k3+1;
end

%Isol
k4=1;
while strcmp(data.textdata(1,k4),'SURFACE NORTH:Surface Outside Face Solar
Radiation Heat Gain Rate per Area [W/m2] (Hourly)')==1
k4=k4+1;
end

%Tsi
k5=1;
while strcmp(data.textdata(1,k5),'NORTH WINDOW:Surface Inside Face Temperature
[C] (Hourly)')==1
k5=k5+1;
end

%Tse
k6=1;
while strcmp(data.textdata(1,k6),'NORTH WINDOW:Surface Outside Face
Temperature [C] (Hourly)')==1
k6=k6+1;
end

%hra
k7=1;
while strcmp(data.textdata(1,k7),'NORTH WINDOW:Surface Outside Face Thermal
Radiation to Air Heat Transfer Coefficient [W/m2-K] (Hourly)')==1
k7=k7+1;
end

%hrs
k8=1;
while strcmp(data.textdata(1,k8),'NORTH WINDOW:Surface Outside Face Thermal
Radiation to Sky Heat Transfer Coefficient [W/m2-K] (Hourly)')==1
k8=k8+1;
end

%hrg
k9=1;
while strcmp(data.textdata(1,k9),'NORTH WINDOW:Surface Outside Face Thermal
Radiation to Ground Heat Transfer Coefficient [W/m2-K] (Hourly)')==1
k9=k9+1;
end

%Tai
k10=1;
while strcmp(data.textdata(1,k10),'ZONE ONE:Zone Mean Air Temperature
[C] (Hourly)')==1
k10=k10+1;
end

k1=k1-1;
k2=k2-1;

```

```

k3=k3-1;
k4=k4-1;
k5=k5-1;
k6=k6-1;
k7=k7-1;
k8=k8-1;
k9=k9-1;
k10=k10-1;

%% nueva matriz de datos

newdata=data.data(i-1:j-1,:);

%%

nIsol=[];
nhrs=[];
nhra=[];
nhrg=[];
nTae=[];
nTse=[];
nTai=[];
nTsi=[];
nTsky=[];
nv=[];

%% Fechas a evaluar

% semana representativa verano

%del 12/8 a 12/14

% semana representativa invierno

%8/10 a 8/16

%%
%temperatura aire, interior[°C]
Tai=newdata(:,k10);

%temperatura aire, exterior[°C]
Tae=newdata(:,k1);

%velocidad viento km/hr
v=newdata(:,k2);

%temperatura cielo[°C]
Tsky=newdata(:,k3);

%irradiancia [W/m2]
Isol=newdata(:,k4);

%temperatura superficial interior[°C]
Tsi=newdata(:,k5);

```

```

%temperatura superficial exterior[°C]
Tse=newdata(:,k6);

%coeficiente radiacion air
hra=newdata(:,k7);

%coeficiente radiacion sky
hrs=newdata(:,k8);

%coeficiente radiacion ground
hrg=newdata(:,k9);

%temperatura aire, interior[°C]
Tai=newdata(:,k10);

aux=[];
for i=1:length(v)-1
    aux=linspace(Isol(i),Isol(i+1),num);
    nIsol=[nIsol aux(1:end-1)];

    aux=linspace(hrs(i),hrs(i+1),num);
    nhrs=[nhrs aux(1:end-1)];

    aux=linspace(hra(i),hra(i+1),num);
    nhra=[nhra aux(1:end-1)];

    aux=linspace(hrg(i),hrg(i+1),num);
    nhrg=[nhrg aux(1:end-1)];

    aux=linspace(Tae(i),Tae(i+1),num);
    nTae=[nTae aux(1:end-1)];

    aux=linspace(Tse(i),Tse(i+1),num);
    nTse=[nTse aux(1:end-1)];

    aux=linspace(Tai(i),Tai(i+1),num);
    nTai=[nTai aux(1:end-1)];

    aux=linspace(Tsi(i),Tsi(i+1),num);
    nTsi=[nTsi aux(1:end-1)];

    aux=linspace(Tsky(i),Tsky(i+1),num);
    nTsky=[nTsky aux(1:end-1)];

    aux=linspace(v(i),v(i+1),num);
    nv=[nv aux(1:end-1)];

end

r1=nIsol;
r2=nhrs;
r3=nhra;
r4=nhrg;
r5=nTae+273.15;
r6=nTse+273.15;

```

```

r7=nTai+273.15;
r8=nTsi+273.15;
r9=nTsky+273.15;
r10=nv;

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if strcmp(o,'s')==1
data=importdata([sur ciudad csv]);
%inicio
i=1;
for i=1:length(data.textdata(:,1))
    if strcmp(data.textdata(i,1),x1)==1
        break
    end
end
end

%termino
j=1;
for j=1:length(data.textdata(:,1))
    if strcmp(data.textdata(j,1),x2)==1
        break
    end
end
end

%% Elegir columnas de datos que se utilizaran

%Tae
k1=1;
while strcmp(data.textdata(1,k1),'Environment:Site Outdoor Air Drybulb
Temperature [C] (Hourly)')==1
k1=k1+1;
end

%v
k2=1;
while strcmp(data.textdata(1,k2),'Environment:Site Wind Speed
[m/s] (Hourly)')==1
k2=k2+1;
end

%Ts
k3=1;
while strcmp(data.textdata(1,k3),'Environment:Site Sky Temperature
[C] (Hourly)')==1
k3=k3+1;
end

%Isol
k4=1;
while strcmp(data.textdata(1,k4),'ZONE SURFACE SOUTH:Surface Outside Face
Solar Radiation Heat Gain Rate per Area [W/m2] (Hourly)')==1
k4=k4+1;
end

```

```

%Tsi
k5=1;
while strcmp(data.textdata(1,k5),'SOUTH WINDOW:Surface Inside Face Temperature
[C] (Hourly)')~=1
k5=k5+1;
end

%Tse
k6=1;
while strcmp(data.textdata(1,k6),'SOUTH WINDOW:Surface Outside Face
Temperature [C] (Hourly)')~=1
k6=k6+1;
end

%hra
k7=1;
while strcmp(data.textdata(1,k7),'SOUTH WINDOW:Surface Outside Face Thermal
Radiation to Air Heat Transfer Coefficient [W/m2-K] (Hourly)')~=1
k7=k7+1;
end

%hrs
k8=1;
while strcmp(data.textdata(1,k8),'SOUTH WINDOW:Surface Outside Face Thermal
Radiation to Sky Heat Transfer Coefficient [W/m2-K] (Hourly)')~=1
k8=k8+1;
end

%hrg
k9=1;
while strcmp(data.textdata(1,k9),'SOUTH WINDOW:Surface Outside Face Thermal
Radiation to Ground Heat Transfer Coefficient [W/m2-K] (Hourly)')~=1
k9=k9+1;
end

%Tai
k10=1;
while strcmp(data.textdata(1,k10),'ZONE ONE:Zone Mean Air Temperature
[C] (Hourly)')~=1
k10=k10+1;
end

k1=k1-1;
k2=k2-1;
k3=k3-1;
k4=k4-1;
k5=k5-1;
k6=k6-1;
k7=k7-1;
k8=k8-1;
k9=k9-1;
k10=k10-1;

%% nueva matriz de datos

newdata=data.data(i-1:j-1,:);

```

```

%%

nIsol=[];
nhrs=[];
nhra=[];
nhrg=[];
nTae=[];
nTse=[];
nTai=[];
nTsi=[];
nTsky=[];
nv=[];

%% Fechas a evaluar

% semana representativa verano

%del 12/8 a 12/14

% semana representativa invierno

%8/10 a 8/16

%%
%temperatura aire, interior[°C]
Tai=newdata(:,k10);

%temperatura aire, exterior[°C]
Tae=newdata(:,k1);

%velocidad viento km/hr
v=newdata(:,k2);

%temperatura cielo[°C]
Tsky=newdata(:,k3);

%irradiancia [W/m2]
Isol=newdata(:,k4);

%temperatura superficial interior[°C]
Tsi=newdata(:,k5);

%temperatura superficial exterior[°C]
Tse=newdata(:,k6);

%coeficiente radiacion air
hra=newdata(:,k7);

%coeficiente radiacion sky
hrs=newdata(:,k8);

%coeficiente radiacion ground

```

```

hrg=newdata(:,k9);

%temperatura aire, interior[°C]
Tai=newdata(:,k10);

%% INTERPOLACION DATOS
aux=[];
for i=1:length(v)-1
    aux=linspace(Isol(i),Isol(i+1),num);
    nIsol=[nIsol aux(1:end-1)];

    aux=linspace(hrs(i),hrs(i+1),num);
    nhrs=[nhrs aux(1:end-1)];

    aux=linspace(hra(i),hra(i+1),num);
    nhra=[nhra aux(1:end-1)];

    aux=linspace(hrg(i),hrg(i+1),num);
    nhrg=[nhrg aux(1:end-1)];

    aux=linspace(Tae(i),Tae(i+1),num);
    nTae=[nTae aux(1:end-1)];

    aux=linspace(Tse(i),Tse(i+1),num);
    nTse=[nTse aux(1:end-1)];

    aux=linspace(Tai(i),Tai(i+1),num);
    nTai=[nTai aux(1:end-1)];

    aux=linspace(Tsi(i),Tsi(i+1),num);
    nTsi=[nTsi aux(1:end-1)];

    aux=linspace(Tsky(i),Tsky(i+1),num);
    nTsky=[nTsky aux(1:end-1)];

    aux=linspace(v(i),v(i+1),60);
    nv=[nv aux(1:end-1)];

end

r1=nIsol;
r2=nhrs;
r3=nhra;
r4=nhrg;
r5=nTae+273.15;
r6=nTse+273.15;
r7=nTai+273.15;
r8=nTsi+273.15;
r9=nTsky+273.15;
r10=nv;

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

if strcmp(o,'e')==1
data=importdata([este ciudad csv]);

%inicio
i=1;
for i=1:length(data.textdata(:,1))
    if strcmp(data.textdata(i,1),x1)==1
        break
    end
end

%termino
j=1;
for j=1:length(data.textdata(:,1))
    if strcmp(data.textdata(j,1),x2)==1
        break
    end
end

%% Elegir columnas de datos que se utilizaran

%Tae
k1=1;
while strcmp(data.textdata(1,k1),'Environment:Site Outdoor Air Drybulb
Temperature [C] (Hourly)')==1
k1=k1+1;
end

%v
k2=1;
while strcmp(data.textdata(1,k2),'Environment:Site Wind Speed
[m/s] (Hourly)')==1
k2=k2+1;
end

%Ts
k3=1;
while strcmp(data.textdata(1,k3),'Environment:Site Sky Temperature
[C] (Hourly)')==1
k3=k3+1;
end

%Isol
k4=1;
while strcmp(data.textdata(1,k4),'ZONE SURFACE EAST:Surface Outside Face Solar
Radiation Heat Gain Rate per Area [W/m2] (Hourly)')==1
k4=k4+1;
end

%Tsi
k5=1;
while strcmp(data.textdata(1,k5),'EAST WINDOW:Surface Inside Face Temperature
[C] (Hourly)')==1
k5=k5+1;
end

%Tse

```

```

k6=1;
while strcmp(data.textdata(1,k6),'EAST WINDOW:Surface Outside Face Temperature
[C] (Hourly)')==1
k6=k6+1;
end

%hra
k7=1;
while strcmp(data.textdata(1,k7),'EAST WINDOW:Surface Outside Face Thermal
Radiation to Air Heat Transfer Coefficient [W/m2-K] (Hourly)')==1
k7=k7+1;
end

%hrs
k8=1;
while strcmp(data.textdata(1,k8),'EAST WINDOW:Surface Outside Face Thermal
Radiation to Sky Heat Transfer Coefficient [W/m2-K] (Hourly)')==1
k8=k8+1;
end

%hrg
k9=1;
while strcmp(data.textdata(1,k9),'EAST WINDOW:Surface Outside Face Thermal
Radiation to Ground Heat Transfer Coefficient [W/m2-K] (Hourly)')==1
k9=k9+1;
end

%Tai
k10=1;
while strcmp(data.textdata(1,k10),'ZONE ONE:Zone Mean Air Temperature
[C] (Hourly)')==1
k10=k10+1;
end

k1=k1-1;
k2=k2-1;
k3=k3-1;
k4=k4-1;
k5=k5-1;
k6=k6-1;
k7=k7-1;
k8=k8-1;
k9=k9-1;
k10=k10-1;

%% nueva matriz de datos

newdata=data.data(i-1:j-1,:);

%%

nIsol=[];
nhrs=[];
nhra=[];
nhrg=[];
nTae=[];
nTse=[];

```

```

nTai=[];
nTsi=[];
nTsky=[];
nv=[];

%% Fechas a evaluar

% semana representativa verano

%del 12/8 a 12/14

% semana representativa invierno

%8/10 a 8/16

%%
%temperatura aire, interior[°C]
Tai=newdata(:,k10);

%temperatura aire, exterior[°C]
Tae=newdata(:,k1);

%velocidad viento km/hr
v=newdata(:,k2);

%temperatura cielo[°C]
Tsky=newdata(:,k3);

%irradiancia [W/m2]
Isol=newdata(:,k4);

%temperatura superficial interior[°C]
Tsi=newdata(:,k5);

%temperatura superficial exterior[°C]
Tse=newdata(:,k6);

%coeficiente radiacion air
hra=newdata(:,k7);

%coeficiente radiacion sky
hrs=newdata(:,k8);

%coeficiente radiacion ground
hrg=newdata(:,k9);

%temperatura aire, interior[°C]
Tai=newdata(:,k10);

aux=[];
for i=1:length(v)-1
    aux=linspace(Isol(i),Isol(i+1),num);
    nIsol=[nIsol aux(1:end-1)];

```

```

aux=linspace(hrs(i),hrs(i+1),num);
nhrs=[nhrs aux(1:end-1)];

aux=linspace(hra(i),hra(i+1),num);
nhra=[nhra aux(1:end-1)];

aux=linspace(hrg(i),hrg(i+1),num);
nhrg=[nhrg aux(1:end-1)];

aux=linspace(Tae(i),Tae(i+1),num);
nTae=[nTae aux(1:end-1)];

aux=linspace(Tse(i),Tse(i+1),num);
nTse=[nTse aux(1:end-1)];

aux=linspace(Tai(i),Tai(i+1),num);
nTai=[nTai aux(1:end-1)];

aux=linspace(Tsi(i),Tsi(i+1),num);
nTsi=[nTsi aux(1:end-1)];

aux=linspace(Tsky(i),Tsky(i+1),num);
nTsky=[nTsky aux(1:end-1)];

aux=linspace(v(i),v(i+1),num);
nv=[nv aux(1:end-1)];

```

end

```

r1=nIsol;
r2=nhrs;
r3=nhra;
r4=nhrg;
r5=nTae+273.15;
r6=nTse+273.15;
r7=nTai+273.15;
r8=nTsi+273.15;
r9=nTsky+273.15;
r10=nv;

```

end

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

if strcmp(o,'o')==1
data=importdata(['oeste ciudad csv']);

%inicio
i=1;
for i=1:length(data.textdata(:,1))
    if strcmp(data.textdata(i,1),x1)==1
        break
    end
end
end

```

```

%termino
j=1;
for j=1:length(data.textdata(:,1))
    if strcmp(data.textdata(j,1),x2)==1
        break
    end
end

%% Elegir columnas de datos que se utilizaran

%Tae
k1=1;
while strcmp(data.textdata(1,k1),'Environment:Site Outdoor Air Drybulb
Temperature [C] (Hourly)')==1
k1=k1+1;
end

%v
k2=1;
while strcmp(data.textdata(1,k2),'Environment:Site Wind Speed
[m/s] (Hourly)')==1
k2=k2+1;
end

%Ts
k3=1;
while strcmp(data.textdata(1,k3),'Environment:Site Sky Temperature
[C] (Hourly)')==1
k3=k3+1;
end

%Isol
k4=1;
while strcmp(data.textdata(1,k4),'ZONE SURFACE WEST:Surface Outside Face Solar
Radiation Heat Gain Rate per Area [W/m2] (Hourly)')==1
k4=k4+1;
end

%Tsi
k5=1;
while strcmp(data.textdata(1,k5),'WEST WINDOW:Surface Inside Face Temperature
[C] (Hourly)')==1
k5=k5+1;
end

%Tse
k6=1;
while strcmp(data.textdata(1,k6),'WEST WINDOW:Surface Outside Face Temperature
[C] (Hourly)')==1
k6=k6+1;
end

%hra
k7=1;
while strcmp(data.textdata(1,k7),'WEST WINDOW:Surface Outside Face Thermal
Radiation to Air Heat Transfer Coefficient [W/m2-K] (Hourly)')==1

```

```

k7=k7+1;
end

%hrs
k8=1;
while strcmp(data.textdata(1,k8),'WEST WINDOW:Surface Outside Face Thermal
Radiation to Sky Heat Transfer Coefficient [W/m2-K] (Hourly)')~=1
k8=k8+1;
end

%hrg
k9=1;
while strcmp(data.textdata(1,k9),'WEST WINDOW:Surface Outside Face Thermal
Radiation to Ground Heat Transfer Coefficient [W/m2-K] (Hourly)')~=1
k9=k9+1;
end

%Tai
k10=1;
while strcmp(data.textdata(1,k10),'ZONE ONE:Zone Mean Air Temperature
[C] (Hourly)')~=1
k10=k10+1;
end

k1=k1-1;
k2=k2-1;
k3=k3-1;
k4=k4-1;
k5=k5-1;
k6=k6-1;
k7=k7-1;
k8=k8-1;
k9=k9-1;
k10=k10-1;

%% nueva matriz de datos

newdata=data.data(i-1:j-1,:);

%%

nIsol=[];
nhrs=[];
nhra=[];
nhrg=[];
nTae=[];
nTse=[];
nTai=[];
nTsi=[];
nTsky=[];
nv=[];

%% Fechas a evaluar

% semana representativa verano

%del 12/8 a 12/14

```

```

% semana representativa invierno

%8/10 a 8/16

%%
%temperatura aire, interior[°C]
Tai=newdata(:,k10);

%temperatura aire, exterior[°C]
Tae=newdata(:,k1);

%velocidad viento km/hr
v=newdata(:,k2);

%temperatura cielo[°C]
Tsky=newdata(:,k3);

%irradiancia [W/m2]
Isol=newdata(:,k4);

%temperatura superficial interior[°C]
Tsi=newdata(:,k5);

%temperatura superficial exterior[°C]
Tse=newdata(:,k6);

%coeficiente radiacion air
hra=newdata(:,k7);

%coeficiente radiacion sky
hrs=newdata(:,k8);

%coeficiente radiacion ground
hrg=newdata(:,k9);

%temperatura aire, interior[°C]
Tai=newdata(:,k10);

aux=[];
for i=1:length(v)-1
    aux=linspace(Isol(i),Isol(i+1),num);
    nIsol=[nIsol aux(1:end-1)];

    aux=linspace(hrs(i),hrs(i+1),num);
    nhrs=[nhrs aux(1:end-1)];

    aux=linspace(hra(i),hra(i+1),num);
    nhra=[nhra aux(1:end-1)];

    aux=linspace(hrg(i),hrg(i+1),num);
    nhrg=[nhrg aux(1:end-1)];

```

```
aux=linspace(Tae(i),Tae(i+1),num);
nTae=[nTae aux(1:end-1)];

aux=linspace(Tse(i),Tse(i+1),num);
nTse=[nTse aux(1:end-1)];

aux=linspace(Tai(i),Tai(i+1),num);
nTai=[nTai aux(1:end-1)];

aux=linspace(Tsi(i),Tsi(i+1),num);
nTsi=[nTsi aux(1:end-1)];

aux=linspace(Tsky(i),Tsky(i+1),num);
nTsky=[nTsky aux(1:end-1)];

aux=linspace(v(i),v(i+1),num);
nv=[nv aux(1:end-1)];
```

end

```
r1=nIsol;
r2=nhrs;
r3=nhra;
r4=nhrg;
r5=nTae+273.15;
r6=nTse+273.15;
r7=nTai+273.15;
r8=nTsi+273.15;
r9=nTsky+273.15;
r10=nv;
```

end

end

A.5 PMV.m

```
%PMV
function y = PMV(x1,x2,o,ciudad,Tventana)

%% Carga de datos

%x1='01/01 01:00:00';
%x2='12/31 24:00:00';
%o='n';
%ciudad='SANTIAGO';

[Tnorte,Teste,Tsur,Toeste,Tsuelo,Ttecho,Tai,HR,Tadj] =
interpDATOSv6b(x1,x2,o,ciudad);
Tventana=[Tventana Tventana(end)];
Tventana=Tventana-273.15;

%% Inputs

% Tasa Metabolica
M=70;      %[W/m2]

% Potencia Mecanica Efectivo
W=0.01;    %[W/m2]

% Aislamiento de la ropa
Icl=0.14;  %[m2 * K/W]

% Temperatura aire
ta=Tadj;   %[°C]

% Temperatura radiante media
if strcmp(o,'n')==1
    fventana=0.34;
    fnorte=0;
    feste=0.103;
    foeste=0.103;
    fsur=0.031;
    fsuelo=0.212;
    ftecho=0.212;
elseif strcmp(o,'e')
    fventana=0.34;
    fnorte=0.103;
    feste=0;
    foeste=0.031;
    fsur=0.103;
    fsuelo=0.212;
    ftecho=0.212;
elseif strcmp(o,'o')
    fventana=0.34;
    fnorte=0.103;
    feste=0.031;
    foeste=0;
    fsur=0.103;
    fsuelo=0.212;
    ftecho=0.212;
elseif strcmp(o,'s')
    fventana=0.34;
```

```

    fnorte=0.031;
    feste=0.103;
    foeste=0.103;
    fsur=0;
    fsuelo=0.212;
    ftecho=0.212;
end
%tr=mean([Tnorte*fnorte;Teste*feste;Tsur*fsur;Toeste*foeste;Tsuelo*fsuelo;Ttecho*ftecho;Tventana*fventana]); % [°C]
tr=(Tnorte.^4*fnorte+Teste.^4*feste+Tsur.^4*fsur+Toeste.^4*foeste+Tsuelo.^4*fsuelo+Ttecho.^4*ftecho+Tventana.^4*fventana).^(1/4);
% Velocidad del aire
var=0; % [m/s]

% Presion parcial vapor de agua [Pa]
pa=[];
for i=1:length(ta)
    if ta(i)>=0
        pa(i)=(610.5*exp(17.269*ta(i)/(237.3+ta(i))))*HR(i)/100;
    else
        pa(i)=(610.5*exp(21.875*ta(i)/(265.5+ta(i))))*HR(i)/100;
    end
end

%% Cálculos %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for i=1:length(pa)

% Calculo fcl, factor de superficie de la ropa [m^2*K/W]

if Icl<=0.078
    fcl=1+1.29*Icl;
else
    fcl=1.05+0.645*Icl;
end

% iteracion para calcular tcl, temperatura de la superficie de la ropa [°C]
%1)nos damos valor de tcl
%2)calculamos hc
%3)calculamos nuevo tcl
%4)si diferencia entre tcl nuevo y tcl viejo es mayor a dt se repite
%proceso.
tclo=20;
tcln=21;
dt=0.01;
contador=0;
tclc=[];
while abs(tclo-tcln)>dt

    tclo=tcln;

% Calculo hc, coeficiente conveccion [W/(m2 K)]
if 2.38*abs(tclo-ta(i))^0.25>12.1*sqrt(var)
    hc=2.38*abs(tclo-ta(i))^0.25;

```

```

else
    hc=12.1*sqrt(var);
end

    tcln=(35.7-0.028*(M-W)-Icl*( (3.96*10^-8)*fcl*((tclo+273)^4-(tr(i)+273)^4)
+ fcl*hc*(-ta(i)) ))/(1+Icl*fcl*hc);
    contador=contador+1;
    tclc=[tclc tcln];
end
tcl=tcln;

pmv(i)=(0.303*exp(-0.036*M)+0.028) * ( (M-W) - 3.05e-3*(5733-6.99*(M-W)-pa(i))
- 0.42*(M-W)-58.15) - 1.7e-5*M*(5867-pa(i)) - 0.0014*M*(34-ta(i)) - 3.96e-
8*fcl*((tcl+273)^4-(tr(i)+273)^4) - fcl*hc*(tcl-ta(i)) );

ppd(i)=100-95*exp(-0.03353*pmv(i)^4-0.2179*pmv(i)^2);

end
y=pmv;
end

```