

## CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE PARA USO EN ACONDICIONAMIENTO EDILICIO

**P. Dellicompagni<sup>1</sup>, N. Castro<sup>2</sup>, J. Franco<sup>3</sup>,**

INENCO – Universidad Nacional de Salta – CONICET - Avda. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina

Email: pablodellicompagni@gmail.com. Tel. 0387-4255424

**D. Heim, A. Wieprzkowicz**

Lodz University of Technology, Wolczanska 213 90-924 Lodz, Polonia

**S. Vera, D. Uribe**

Pontificia Universidad Católica de Chile

*Recibido 25/07/17, aceptado 26/09/17*

**RESUMEN:** en el presente trabajo se muestra el estudio sobre el potencial energético de un material de cambio de fase (PCM) como la parafina de estado puro para su uso en aplicaciones destinadas al acondicionamiento edilicio. El estudio de las propiedades físicas, como ser capacidad específica y temperatura de cambio de fase se realiza mediante calorimetría diferencial de barrido (Differential Scanning Calorimetry, DSC) sobre una muestra de volumen y masa especificados. Las propiedades ópticas, como ser transmitancia espectral, se determinaron mediante un espectroradiómetro Li – 1800 para los casos en que la parafina se encuentra en estado sólido y líquido. Por último, se realiza la simulación de las condiciones térmicas para un recinto cerrado y aislado térmicamente del exterior y con una ventana doble vidriada, orientada hacia al norte, en la cual se coloca la parafina entre dichos vidrios. Se toma el caso de estudio para la ciudad de Santiago de Chile, considerando los días característicos de cada mes.

**Palabras clave:** PCM, eficiencia energética, acondicionamiento edilicio, Simusol.

### 1. INTRODUCCION

El almacenamiento térmico en materiales de cambio de fase por medio del calor latente se ha convertido en un tópico de interés por parte de los investigadores (Ushak et al., 2016). La principal ventaja del almacenamiento por calor latente es el elevado intercambio energético entre la sustancia y el medio externo, para saltos pequeños de temperatura (Cabeza et al., 2011). Como desventaja de estas técnicas se puede mencionar el costo de las instalaciones que demanda su implementación, dado que se deben evitar las pérdidas o fugas del material, además del costo mismo del PCM, alrededor de €/kg 36.85 ([www.rubitherm.com](http://www.rubitherm.com)). El uso de PCM en ventanas permite regular las pérdidas térmicas a través de ellas, las cuales suelen ser del orden del 10 – 25%, para épocas invernales sin PCM. Así mismo, para épocas de verano o de alta irradiación solar, la elevada ganancia térmica a través de las ventanas conducen a un incremento en la carga térmica y por consiguiente mayores inversiones en los equipos de climatización para enfriamiento. Para éstos casos, suelen emplearse gases de absorción térmica tales como mezclas de HFC/32, HFC/134a, HFC/143a y SF<sub>6</sub> y CFC/12, CFC/13, CFC/14 y SF<sub>6</sub>, ambas mixturas en partes iguales (Ismail et al., 2008).

El presente artículo trata el análisis térmico de un recinto cuya pared expuesta a la radiación solar es de 2.4 m x 2.4 m y su profundidad es de 6 m. El mismo se encuentra aislado en sus paredes y posee una ventana orientada hacia el norte (figura 1), de doble vidrio con un intersticio para el llenado con PCM (parafina de estado puro). El análisis de éste escenario surge como parte de un proyecto conjunto entre el Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales (INENCO), la Universidad Tecnológica de Lodz, la Pontificia Universidad Católica de Chile y otras instituciones a través del proyecto SOLTREN ELAC2015 bajo el programa ERANet-LAC: Latin America, Caribbean and European Union.

<sup>1</sup> Becario Doctoral CONICET

<sup>2</sup> Becario Doctoral PyCT

<sup>3</sup> Investigador Adjunto CONICET

Se toma como caso de estudio a dicho recinto emplazado en la localidad de Santiago de Chile con el objetivo de analizar las variaciones térmicas en el interior del mismo. Para ello se cuenta con una base de datos de radiación global horizontal, velocidad del viento y temperatura de bulbo seco (ambiente) en una serie de datos medidos en estación terrestre local. En figura 2 se muestra la variación anual de la radiación global sobre plano horizontal para Santiago de Chile (año 1987).

Se empleará el programa Simusol (Alias et al., 2012) para realizar el análisis térmico en el interior del recinto. Para la programación se tomarán los datos climáticos de Santiago de Chile así como las propiedades físico – térmicas de la parafina empleada.

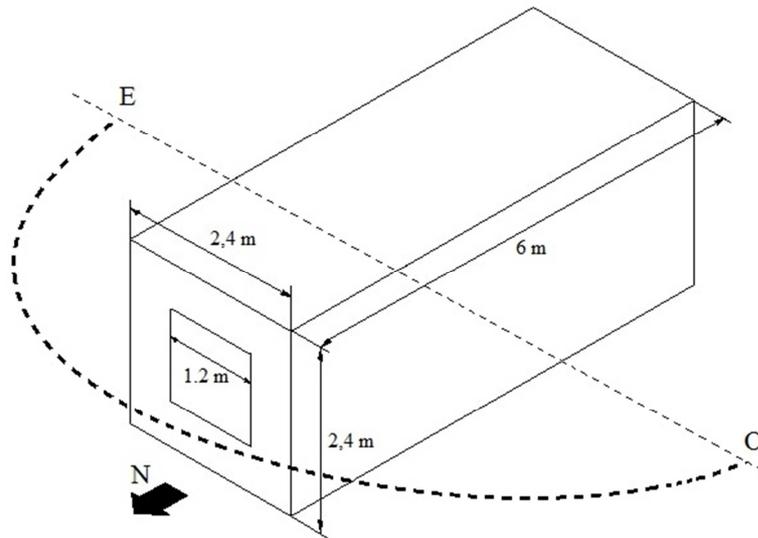


Figura 1: Esquema del recinto considerado para el análisis térmico.

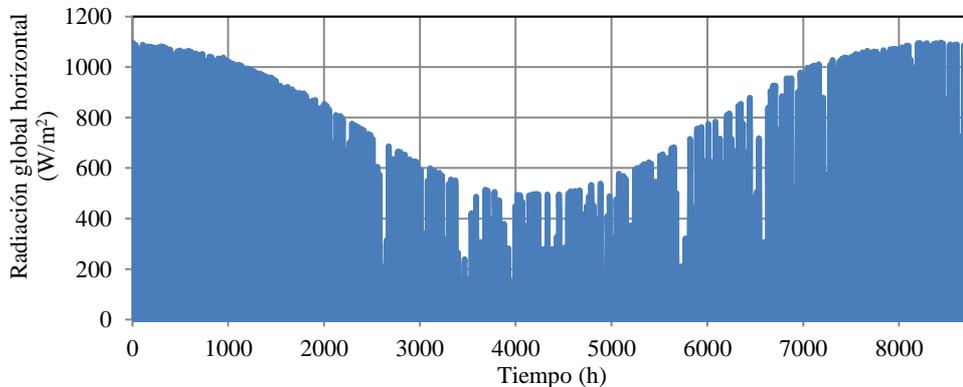


Figura 2: Radiación global sobre plano horizontal medida en Santiago de Chile.

## 2. PROPIEDADES FISICO – TERMICAS DEL PCM EMPLEADO

A los efectos de realizar la programación en Simusol, interesa determinar las propiedades térmicas del material de cambio de fase. La sustancia empleada es parafina cuya denominación es 25/RT25HC y su punto de fusión ronda los 25 °C. También interesa determinar la transmitancia espectral o promedio de la misma. Esto último se realiza mediante un espectroradiómetro marca Licor, modelo Li – 1800.

### 2.1. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

El instrumental utilizado se muestra en la figura 3. El mismo es un calorímetro diferencial empleado para determinar cómo varían las propiedades físicas de una determinada sustancia conforme transcurre la *transición térmica* en la misma. El principio de funcionamiento se basa en la diferencia de calor entre una muestra y una referencia, medida como una función de la temperatura. Esto permite

determinar la cantidad de calor que absorbe o libera una sustancia para diversos estados térmicos, los cuales pueden ser constantes o variables (Suriñach et al., 1992).



Figura 3. Izquierda: equipo para el barrido DSC marca TA – instruments. Derecha: muestra de 11.82 mg de PCM para el DSC.

El parámetro a determinar es la capacidad calorífica del PCM, medido en  $J/kg^{\circ}C$ . Para ello se procede a colocar una pequeña muestra de la parafina en un contenedor pequeño (figura 3), previamente tarado en una balanza de precisión.

La cantidad de parafina empleada es 11.82 mg. Esta muestra se coloca sobre uno de los electrodos térmicos del equipo DSC, con la parafina en su interior. En el otro electrodo se coloca una celda vacía, que se usa como referencia, para el análisis térmico diferencial. Los resultados del barrido diferencial se exportan en un archivo formato .txt o .xls, pudiéndose optar por otros formatos acorde a la necesidad. El parámetro de interés, para la simulación computacional, es la capacidad calorífica en función de la temperatura.

El tiempo que tomo el barrido fue de 16.837 minutos. Esto se debe a que inicialmente se realiza la estabilización de la muestra a  $-10^{\circ}C$ , seguido de las siguientes etapas del proceso.

- 1: Equilibrate at  $-10.00^{\circ}C$
- 2: Isothermal for 2.00 min
- 3: Mark end of cycle 1
- 4: Ramp  $10.00^{\circ}C/min$  to  $90.00^{\circ}C$
- 5: Isothermal for 3.00 min
- 6: Mark end of cycle 2
- 7: Modulate  $\pm 1.00^{\circ}C$  every 120 s
- 8: Ramp  $10.00^{\circ}C/min$  to  $90.00^{\circ}C$
- 9: Isothermal for 2.00 min
- 10: Mark end of cycle 3
- 11: Modulate  $\pm 1.00^{\circ}C$  every 120 s
- 12: Ramp  $10.00^{\circ}C/min$  to  $90.00^{\circ}C$
- 13: Mark end of cycle 4

Nótese que según el listado de procesos, se realizaron tres ciclos (o rampas) de calentamiento desde  $-10^{\circ}C$  hasta  $90^{\circ}C$ , manteniendo la muestra estable en las temperaturas extremas durante 2 minutos para el primer ciclo y 3 minutos para el segundo y tercer ciclo. Esto es útil para determinar si los procesos dinámicos que ocurren en la muestra poseen intercambio de calor irreversible o no.

La capacidad calorífica se obtiene del cociente entre el poder calorífico ( $cp$  en  $mJ/^{\circ}C$ , heat capacity) y la masa de la muestra en mg. Su variación con respecto a la temperatura se muestra en la figura 4.

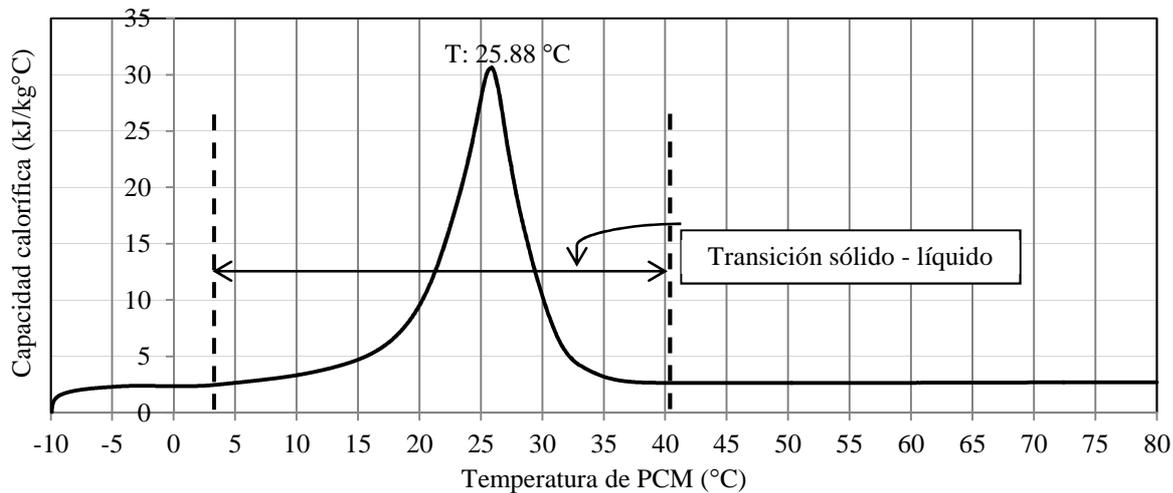


Figura 4. Curva representativa de la capacidad calorífica del PCM.

Esta curva muestra cómo la capacidad calorífica varía con la temperatura de la parafina, observándose la región de transición desde el estado sólido al líquido, manifestándose un pico a una temperatura de 25.88 °C, la cual es la temperatura de fusión. Puede decirse que a 40 °C la parafina se encuentra en estado líquido por completo. Además, la curva de la figura 4 es el resultado de la superposición de los tres ciclos ensayados que, al ser idénticos, significa que la parafina empleada presenta estabilidad química ante la ausencia de procesos irreversibles.

La variación de la capacidad calorífica con respecto a la temperatura de la muestra puede representarse mediante una función de distribución gaussiana, montada sobre una función constante. Dicha expresión está dada por la ecuación 1.

$$C_p = 28 \times 10^3 * e^{-\frac{(T(^{\circ}C)-25.881)}{2 * 2.44^2}} + 2500 \text{ (J/kg}^{\circ}\text{C)} \quad (1)$$

Esta expresión se emplea en Simusol para el cálculo de la capacidad calorífica del PCM.

## 2.2. Transmitancia espectral y promedio del PCM

Este ensayo se realizó con un espectroradiómetro marca Licor, modelo Li – 1800. Para ello se fabricaron dos celdas de vidrio de 50 mm de lado y un gap interior de 12 mm, una celda vacía que sirve de referencia y otra con la parafina en su interior. A esta última, se le aplicó una capa lateral de pintura negra para alta temperatura, a efectos de evitar la ganancia solar por las paredes de la celda.



Figura 5. Izquierda: celda con PCM sobre instrumento Li-1800. Derecha: celdas vacías.

El ensayo de transmitancia se realizó el día 12/05/2017 entre las 15:09 hs y las 15:31 hs. En este período de tiempo, el ángulo de incidencia solar varió desde 50° hasta 54° (Hernández et al., 2003), como se muestra en la figura 6. Si bien los valores de transmitancia espectral dependen con el ángulo de incidencia solar, se trabajó por debajo de los 70° críticos según la literatura (Duffie and Beckman, 2003), donde la transmitancia espectral se ve afectada por un factor de 0.95.

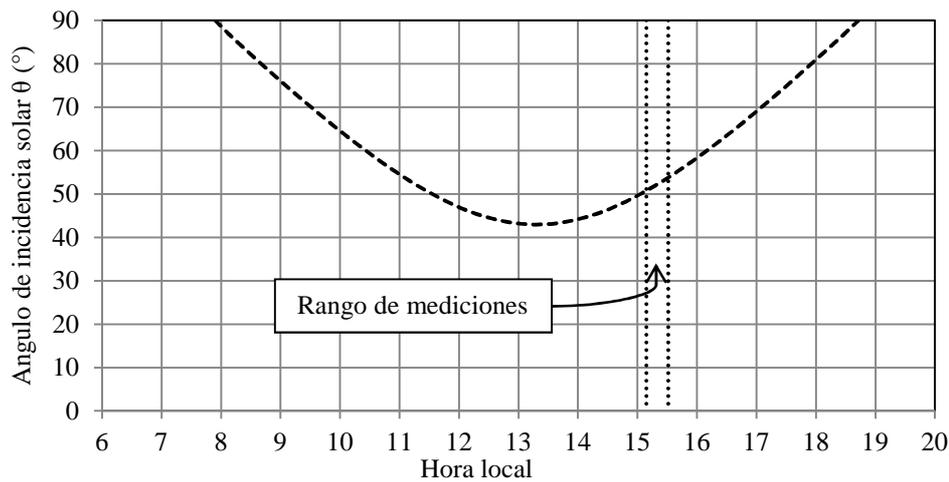


Figura 6. Variación del ángulo de incidencia para el día 12/05/2017.

Las mediciones que se realizaron se muestran en las curvas de la figura 7. Cada medición tomó alrededor de 30 segundos más el tiempo que toma realizar el cambio de las celdas o muestras a medir.

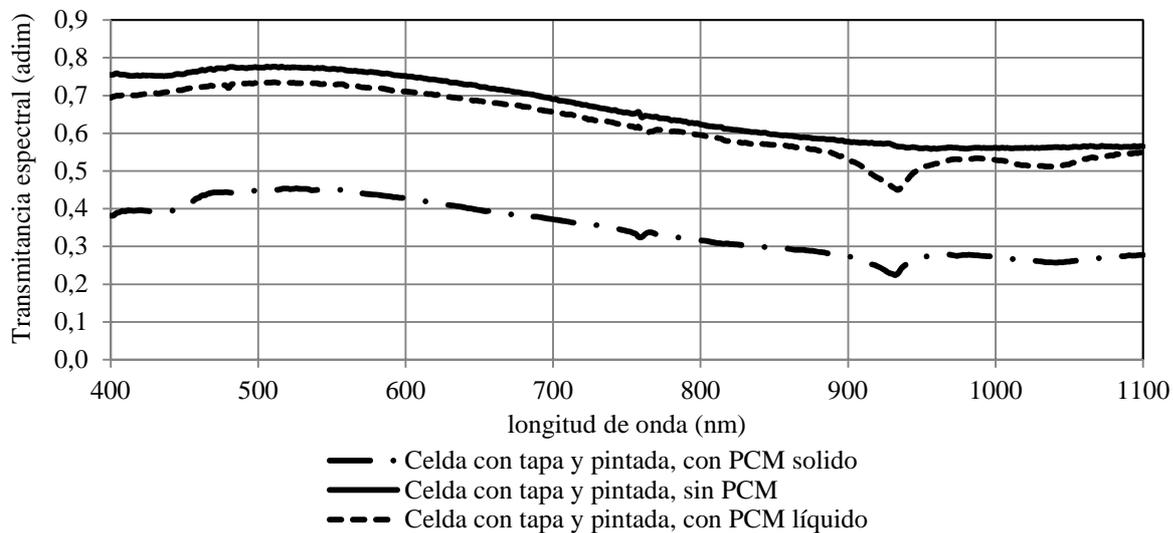


Figura 7. Transmitancia espectral de las muestras.

De la figura 7 se define una transmitancia promedio de 0.65 y 0.35 para PCM líquido y sólido, respectivamente. Se observa una zona de absorción para longitudes de ondas que rondan los 922 nm. Se tomarán estos valores de transmitancia para la simulación, considerando que la temperatura umbral entre el estado sólido y líquido es 25.88 °C.

### 3. SIMULACION NUMERICA EN SIMUSOL

Los valores de capacidad calorífica y transmitancia espectral promedio que se definieron en las secciones anteriores serán utilizados como datos de entrada para la modelización térmica del recinto. Para la simulación se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones. Se realizara el análisis térmico para los días característicos de cada mes.

#### 3.1. Consideraciones geométricas y de materiales

Como se mostró en la figura 1, la habitación es de forma prismática cuyas paredes frontal (orientada al norte) y de fondo son de 2.4 m x 2.4 m. Las paredes laterales, así como el techo y el piso son de idénticas dimensiones, siendo éstas 2.4 m x 6 m. La ventana que permite la ganancia solar está ubicada en el centro de la pared frontal y sus dimensiones son 1.2 m x 1.2m. El perfil transversal de la misma puede verse en el esquema de la figura 8.

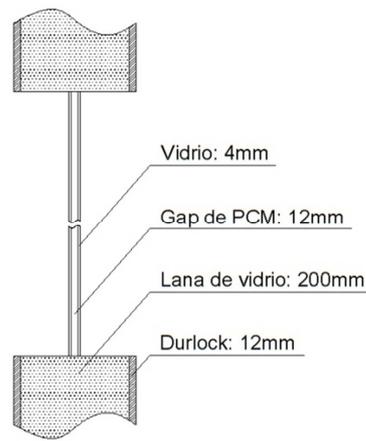


Figura 8. Configuración de ventana – pared frontal.

Los vidrios a emplear son del tipo común, de 4 mm de espesor. El intersticio (gap) donde se aloja el PCM es de 12 mm. Todas las paredes del recinto están construidas en una configuración yeso – aislante – yeso.

### 3.2. Consideraciones térmicas y modelos para Simusol

En primera instancia, se considera que el recinto no tiene intercambio térmico a través de las paredes dada la capa aislante que posee. Solo posee intercambio térmico a través de la ventana y de la pared frontal.

La figura 9 muestra el modelo de transferencia térmica a través de la ventana doble vidriada con PCM en su interior. El aire ambiente está a una cierta temperatura, variable durante el día. El Primer mecanismo de transferencia es la convección paralela a la radiación entre la superficie exterior del primer vidrio y el aire ambiente. Así mismo, la radiación solar (1) ingresa a través del vidrio exterior y su energía se va degradando por las transmitancias del conjunto vidrio – PCM – vidrio hasta llegar al recinto (2). Por último se tiene convección y radiación entre la superficie externa del vidrio interior y el ambiente del recinto. En centro del diagrama se cuenta con las conductancias de los distintos materiales que componen la ventana.

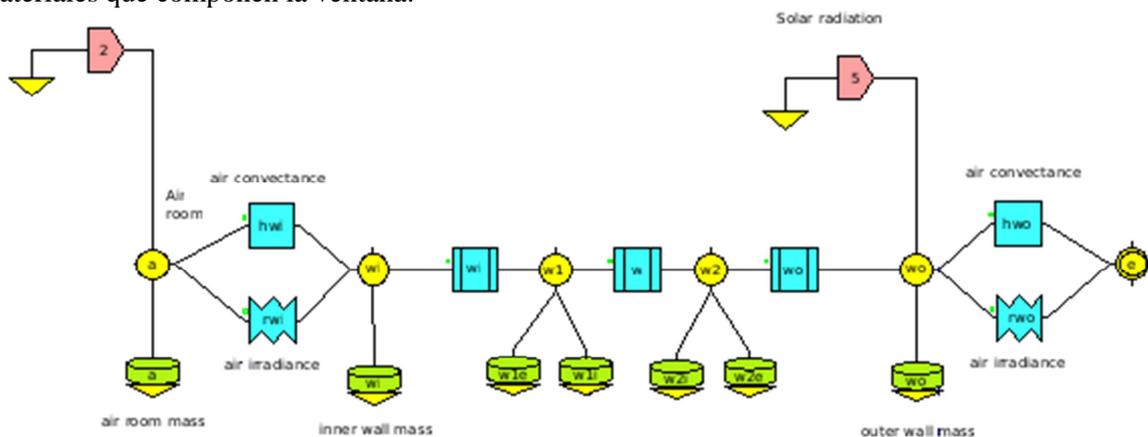


Figura 9. Circuito térmico de ventana con PCM.

La figura 10 presenta el modelo para la pared frontal, la cual está orientada hacia el norte. La configuración de elementos térmicos en éste caso es similar al de la ventana, con tres capas conductivas y los mecanismos de convección y radiación hacia el ambiente y hacia el interior del recinto. La radiación solar (5) incide sobre la pared solamente.

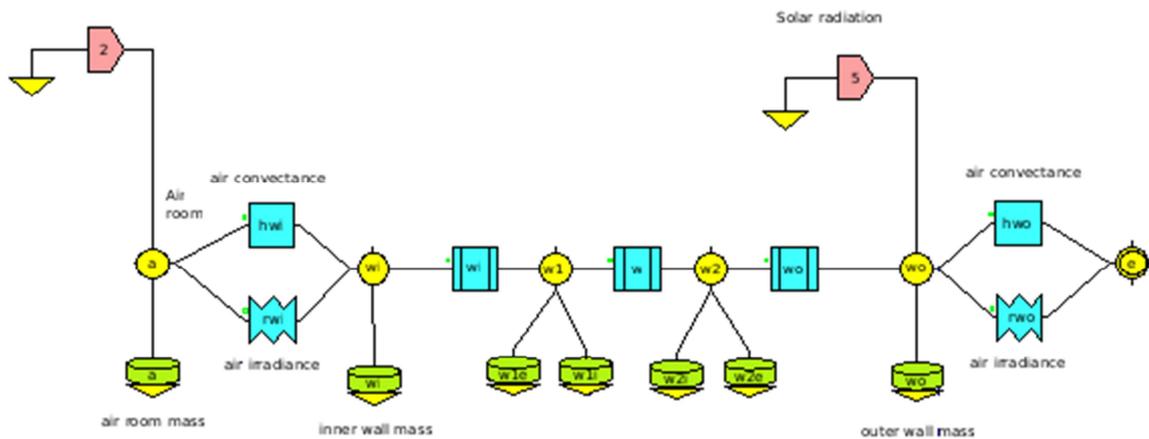


Figura 10. Circuito térmico de pared frontal, orientada hacia el norte.

La siguiente figura representa los circuitos térmicos para la pared de fondo (arriba) y las paredes laterales, techo y piso (abajo) que, al ser de idénticos materiales, se realiza un solo modelo reuniendo las características físico – térmicas de todos ellos. Estos cinco cerramientos no reciben radiación solar y se considera a los recintos contiguos de temperatura idéntica a la del recinto en estudio.

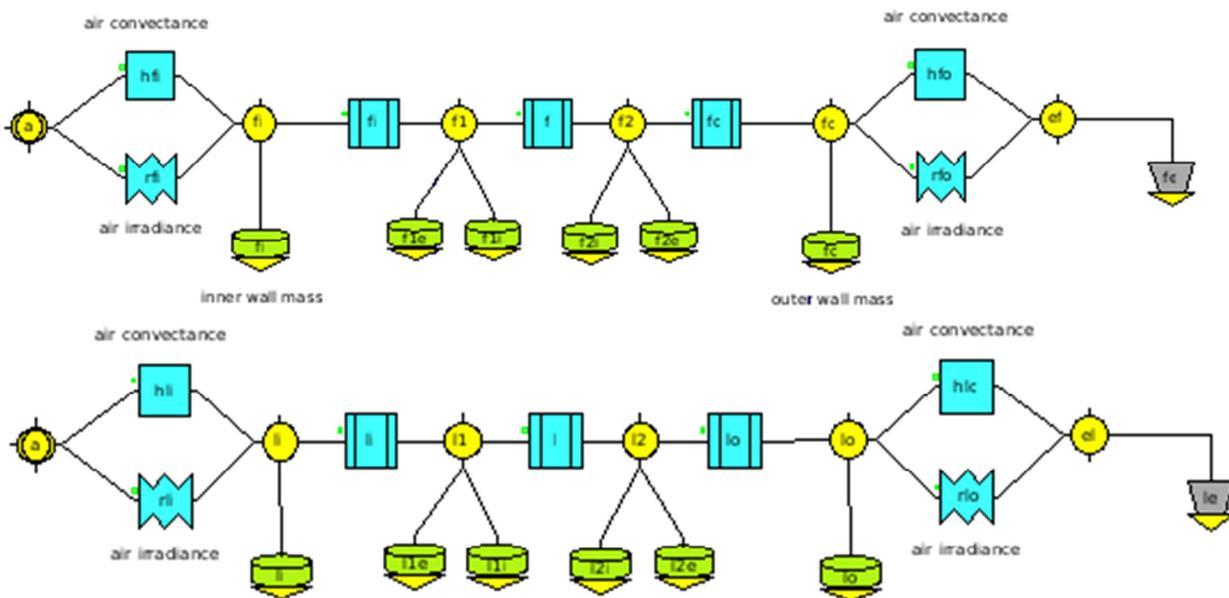


Figura 11. Circuitos térmicos para pared de fondo (arriba) y cerramientos laterales (abajo).

### 3.3. Tablas y cuadros: programación en Día

La figura 12 reúne los distintos cuadros y tablas empleados para la programación en la interface Día. Principalmente se distinguen los siguientes cuadros.

- **Datos**, en los cuales se colocan todos los parámetros geométricos, físicos y térmicos de los elementos que componen los distintos circuitos o modelos.
- **Funciones**, donde se escribe la función de distribución gaussiana empleada para el cómputo de la capacidad calorífica del PCM conforme varía su temperatura.
- **Iniciales**, se emplean para configurar las temperaturas iniciales de aquellos nodos térmicos que constan de masa. Esto se debe a que una masa es equivalente a una capacitancia eléctrica, cuyas ecuaciones en el dominio del tiempo necesitan las condiciones iniciales en el momento de ejecutar la simulación.
- **Controles**, se definen tres características de la simulación: rutina de integración, tamaño del paso de cálculo y la cantidad máxima de pasos iterativos.

- *Tiempo*, se define el tiempo de duración de la simulación.
- *Parámetros*, se emplean para definir parámetros de valor fijo durante la simulación, los mismos pueden ser modificados a efectos de obtener resultados diferentes.
- *Agregar – gráficos*, el mismo sirve para agregar graficas cuyos ejes muestren relaciones entre variables que no sea el tiempo. En éste caso se relaciona la capacidad calorífica con la temperatura media del PCM y la transmitancia espectral del PCM (en función de la misma temperatura).
- *TablaTr*, la misma se emplea para establecer la relación entre la temperatura media del PCM y la transmitancia espectral del mismo.
- *Resultados*, se definen los parámetros que se desea mostrar, en función del tiempo. De no existir este cuadro, Simusol muestra las temperaturas de todos los nodos intervinientes en la programación.

<b>resultados</b> tempo(tempe, Temperature, °C) tempv1(tempv1i, Temperature, °C) tempv2(tempv2e, Temperature, °C) tempa(tempa, Temperature, °C) #Ele(Ele, colindant room temperature, °C) J1(J1, Solar Radiation, W) J2(J2, Solar Radiation, W) J5(J5, Solar Radiation, W) PTpcm(PTpcm, Temperature, °C) PCp(PCp, HC, J/kgC) Ptr(Ptr, transmittance, -)	<b>Datos</b> Ee=TablaTenv(tiempo) J1=Q, 1.2*1.2, TablaRad(tiempo) J2=Q, 1.2*1.2, TablaRad(tiempo)*TablaTr(PTpcm)*0.85**2 J5=Q, 2.4*2.4-1.2*1.2, TablaRad(tiempo) Rhe=V1, 1.2*1.2, 5.8+2.3*tablaWind(tiempo) Rre=R1, 1.2*1.2, 0.83, 1 R1=D1, 1.2*1.2, 0.004, 0.8 R2=D1, 1.2*1.2, 0.012, 0.21 R3=D1, 1.2*1.2, 0.004, 0.8 Rha=V1, 1.2*1.2, 5.8 Rra=R1, 1.2*1.2, 0.83, 1 Cv1e=Cv1=C1, 870, 3 Cv2e=Cv2=C1, 870, 3 Cpe=Cpi=C1, PCp, 7.6 Ca=C1, 1000, 2.4**2*6*1.2 Rhw=V1, 2.4*2.4-1.2*1.2, 10 Rrw=R1, 2.4*2.4-1.2*1.2, 0.93, 1 Rwi=Rwo=D1, 2.4*2.4-1.2*1.2, 0.012, 0.81 Rw=D1, 2.4*2.4-1.2*1.2, 0.2, 0.035 Rho=V1, 2.4*2.4-1.2*1.2, 5.8+2.3*tablaWind(tiempo) Rrwo=R1, 2.4*2.4-1.2*1.2, 0.93, 1 Cwi=Cwo=Cw1e=Cw2e=C1, 837, 46.656 Cw1=Cw2=C1, 670, 43.2	<b>datos</b> Efe=E1, Ple Rhfi=V1, 2.4*2.4, 5.8 Rrfi=R1, 2.4*2.4, 0.94, 1 Rfi=Rfo=D1, 2.4*2.4, 0.012, 0.81 Rf=D1, 2.4*2.4, 0.2, 0.0001 Rhfo=V1, 2.4*2.4, 5.8 Rrfo=R1, 2.4*2.4, 0.93, 1 Cfi=Cfo=Cf1e=Cf2e=C1, 837, 43.2 Cf1=Cf2=C1, 670, 57.6		
<b>datos</b> Ele=E1, Ple Rhfi=V1, 4*(2.4*6), 5.8 Rrfi=R1, 4*(2.4*6), 0.94, 1 Rfi=Rfo=D1, 4*(2.4*6), 0.012, 0.81 Rf=D1, 4*(2.4*6), 0.2, 0.0001 Rhfo=V1, 4*(2.4*6), 5.8 Rrfo=R1, 4*(2.4*6), 0.93, 1 Cfi=Cfo=C1e=C1e=C1, 837, 4*155.52 Cf1=Cf2=C1, 670, 4*144	<b>parametros</b> Prep=2 PShad=TablaSh(tempa) Ptr=TablaTr(PTpcm) PTpcm=(tempv1i+tempv2i)/2 PCp=QCp(PTpcm)			
<b>agregar-graficos</b> lineas grafTPc=Simulado,PTpcm:PCp lineas grafTr=Simulado,PTpcm:Ptr	<b>iniciales</b> tempf1=tempf0=15 tempf2=tempf2=15	<b>iniciales</b> temp1=tempo=15 temp2=tempo=15	<b>Tabla Tr</b> -15,0.35 0,0.35 15,0.35 25.88,0.35 25.88,0.65 36.76,0.65 47.64,0.65 58.52,0.65 69.40,0.65 80.28,0.65 91.16,0.65	<b>controles</b> integration routine=implicit MINIMUM STEP SIZE=1.E-400 MAXIMUM INTEGRATION PASSES=2000000
<b>funciones</b> #PCp=8173 QCp(PTpcm)=(28*2.718282**(-(PTpcm-25.88)**2)/(2*2.44*2.44))**1000+2500	<b>iniciales</b> tempv1e=tempv1i=15 tempv2e=tempv2i=15 tempa=15 tempwi=tempwo=15 tempw1=tempw2=15	<b>tiempo</b> Prep*120 horas	<b>parametros</b> Ple=tempa	

Figura 12. Cuadros de diálogos y tablas empleadas en la programación.

### 3.4. Consideraciones climáticas.

Se cuenta con una base de datos terrestres medidos de radiación global sobre plano horizontal, velocidad de viento y temperatura ambiente. En el caso de la radiación global horizontal, se aplicó el método de Liu – Jordan para determinar la radiación sobre el plano vertical. Se optó por éste método dado que al contar con mediciones de radiación y por ende de energía, se pudieron estimar los promedios diarios mensuales (figura 13), los cuales son parámetros de entrada de dicho método de estimación (Duffie and Beckman, 2003). Para ello se usó el programa GEOSOL, diseñado por el Dr. Hernández Alejandro (2003).

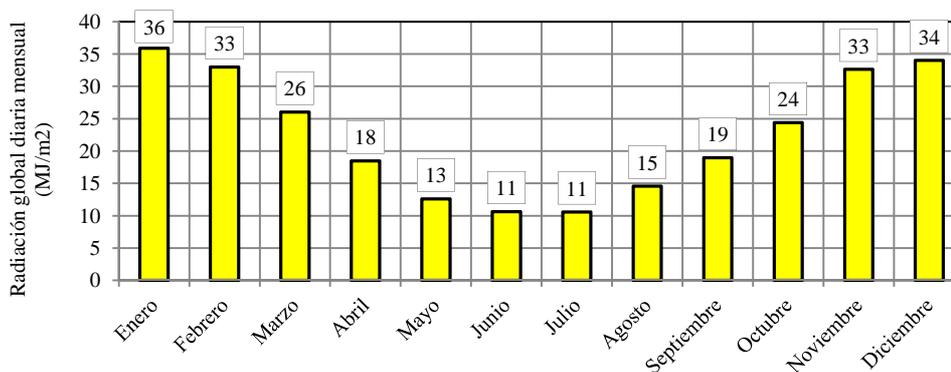


Figura 13. Radiación global horizontal promedio diario mensual para Santiago de Chile.

Con respecto a las velocidades de viento, sus valores están dados en m/s y se emplean para el cálculo de los coeficientes convectivos (Duffie and Beckman, 2003) entre las paredes y el aire circundante, así como para las ventanas. La temperatura de bulbo seco es la temperatura del aire exterior. La misma varía horariamente durante el día. En la figura 14 se muestran las tablas empleadas para los días  $n = 14, 15, 16, 17$  y  $18$  (Enero).

TablaRad	81.581 82.715 83.822 84.872 85.864 86.858 87.748 88.583 89.264 90.0 105.0 106.2 107.337 108.741 109.881 110.847 111.742 112.573 113.256 114.0 120.0	TablaWind	42.5.1 43.5.7 44.2.1 45.1.5 46.2.1 47.1.5 48.1 49.1 50.1 51.0 52.0.5 53.1 54.0 55.0 56.1 57.1.5 58.1.5 59.1.5 60.2.1 61.4.1 62.4.6 63.6.2 64.6.7 65.6.2 66.5.1 67.2.6 68.3.1 69.1 70.0 71.2.1 72.3.1 73.1 74.3.1 75.2.8 76.2.6 77.1 78.1.5 79.0 80.0.5 81.0.5 82.1.5 83.1 84.2.6	85.6.2 86.9.8 87.7.7 88.7.2 89.6.2 90.5.1 91.6.7 92.4.6 93.3.6 94.2.6 95.2.6 96.1.5 97.2.1 98.0.5 99.1 100.1 101.2.1 102.1 103.1.5 104.1 105.1 106.2 107.1 108.2.8 109.4.6 110.5.1 111.5.7 112.5.7 113.6.2 114.4.9 115.3.6 116.1.5 117.2.6 118.3.1 119.0 120.0	TablaTenv	42.20 43.17.8 44.17 45.16 46.14.9 47.15 48.11 49.9.5 50.9 51.9 52.7.6 53.7 54.6 55.8.8 56.13 57.17 58.19.4 59.23 60.25 61.26.9 62.28 63.28 64.26.8 65.25 66.23 67.21.9 68.20 69.16 70.15.4 71.15 72.15 73.13.5 74.12 75.11.7 76.11.5 77.10 78.9 79.10.5 80.15 81.18 82.21.7 83.26 84.27	85.28.3 86.26 87.25 88.23.2 89.20 90.18 91.16.5 92.15 93.14 94.13.3 95.13 96.13 97.12.1 98.11 99.10 100.11 101.12 102.13 103.12 104.13 105.13 106.13.9 107.15 108.18.7 109.22.4 110.23 111.23 112.22 113.21 114.18.5 115.16 116.15 117.14 118.13.4 119.13 120.12.6
Rep = Prep factores = 3600.1 0.0 7.0 8.194 9.583 10.760 11.843 12.890 13.864 14.850 15.730 16.567 17.299 18.0 30.0 31.40 32.307 33.470 34.103 35.70 36.532 37.654 38.776 39.715 40.398 41.293 42.0 54.0 55.38 56.308 57.565 58.727 59.843 60.887 61.880 62.856 63.756 64.564 65.287 66.0 78.0 79.34 80.299	0.3.6 1.2.1 2.0.5 3.0.2 4.0 5.0 6.0 7.0.5 8.1 9.0.5 10.4.1 11.5.1 12.6.7 13.6.2 14.8.2 15.7.2 16.7.7 17.6.2 18.4.6 19.3.1 20.7.7 21.5.1 22.2.1 23.1.5 24.0.5 25.2.1 26.2.1 27.0.5 28.0.7 29.1 30.2.6 31.2.6 32.4.1 33.2.3 34.0.5 35.2.1 36.3.1 37.4.1 38.2.6 39.4.1 40.6.7 41.5.7	42.5.1 43.5.7 44.2.1 45.1.5 46.2.1 47.1.5 48.1 49.1 50.1 51.0 52.0.5 53.1 54.0 55.0 56.1 57.1.5 58.1.5 59.1.5 60.2.1 61.4.1 62.4.6 63.6.2 64.6.7 65.6.2 66.5.1 67.2.6 68.3.1 69.1 70.0 71.2.1 72.3.1 73.1 74.3.1 75.2.8 76.2.6 77.1 78.1.5 79.0 80.0.5 81.0.5 82.1.5 83.1 84.2.6	85.6.2 86.9.8 87.7.7 88.7.2 89.6.2 90.5.1 91.6.7 92.4.6 93.3.6 94.2.6 95.2.6 96.1.5 97.2.1 98.0.5 99.1 100.1 101.2.1 102.1 103.1.5 104.1 105.1 106.2 107.1 108.2.8 109.4.6 110.5.1 111.5.7 112.5.7 113.6.2 114.4.9 115.3.6 116.1.5 117.2.6 118.3.1 119.0 120.0	Rep = Prep factores = 3600.1 0.14 1.14 2.14 3.14 4.14 5.14 6.14 7.15 8.16 9.18 10.20.2 11.19 12.21 13.21.2 14.20 15.19 16.18.5 17.18 18.16.7 19.15.4 20.13 21.12 22.11 23.10 24.9 25.8 26.8 27.7 28.6 29.5 30.4 31.9 32.12 33.14.5 34.17 35.19 36.20 37.21.7 38.22 39.24 40.23.5 41.22	42.20 43.17.8 44.17 45.16 46.14.9 47.15 48.11 49.9.5 50.9 51.9 52.7.6 53.7 54.6 55.8.8 56.13 57.17 58.19.4 59.23 60.25 61.26.9 62.28 63.28 64.26.8 65.25 66.23 67.21.9 68.20 69.16 70.15.4 71.15 72.15 73.13.5 74.12 75.11.7 76.11.5 77.10 78.9 79.10.5 80.15 81.18 82.21.7 83.26 84.27	85.28.3 86.26 87.25 88.23.2 89.20 90.18 91.16.5 92.15 93.14 94.13.3 95.13 96.13 97.12.1 98.11 99.10 100.11 101.12 102.13 103.12 104.13 105.13 106.13.9 107.15 108.18.7 109.22.4 110.23 111.23 112.22 113.21 114.18.5 115.16 116.15 117.14 118.13.4 119.13 120.12.6	

Figura 14. Tablas con datos climáticos para  $n = 14, 15, 16, 17$  y  $18$  (Enero).

#### 4. RESULTADOS

Con los modelos térmicos plasmados en el programa Día y los cuadros y tablas auxiliares escritos en el mismo entorno, se ejecuta el Simusol en una terminal abierta desde el directorio donde está ubicado el archivo .dia. Para este caso de estudio, se realiza la simulación de 10 días consecutivos tomando como base la medición climática de 5 días, por lo que el parámetro *Prep* se configura en un valor de 2, se muestran las curvas para los meses de Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre. Unas de las condiciones dentro del proyecto SOLTREN es que la temperatura interior del recinto debe mantenerse alrededor de 26 °C. En la figura 16.a se observan las temperaturas que el recinto alcanza los cuatro meses representativos del año. La temperatura que alcanza el recinto resulta excesiva para las condiciones de confort propuestas en el proyecto SOLTREN, sobre todo en los meses de mayor irradiación solar, donde la misma alcanza valores por encima de los 70 °C. Esto sucede cuando se tienen varios días consecutivos de radiación solar, para lo cual se deben establecer estrategias de control actuando directamente sobre la ganancia solar (sombreo de ventana) o bien el empleo de acondicionamiento mediante equipos de frío / calor.

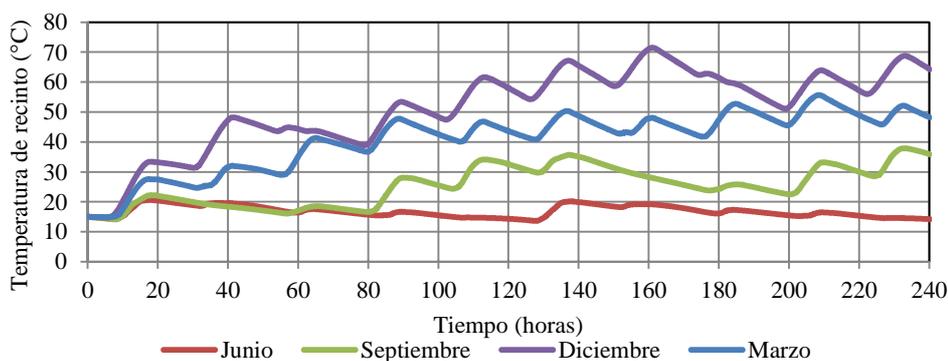


Figura 15. Temperatura interior del recinto.

#### 4.1. Sombreado de ventana

Dentro de la simulación se plantea una estrategia de control de temperatura actuando directamente sobre la ganancia solar que incide en la ventana, mediante tablas del tipo *on - off* (con 0 y 1) que simulen una persiana que se abre o cierra según la temperatura del recinto. En la práctica, esto podría implementarse mediante un sistema de sensores de temperatura y actuadores que operen sobre una persiana motorizada. Se muestra en figura 16 las temperaturas del recinto para cada mes con la implementación de ésta estrategia.

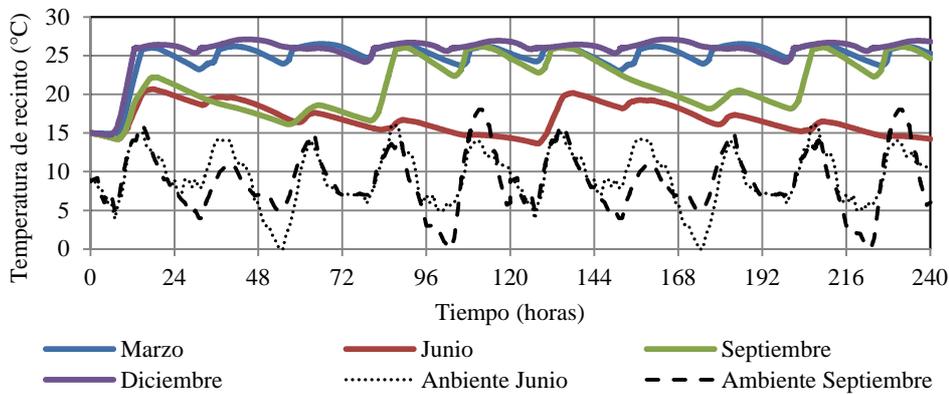


Figura 16. Temperatura de recinto con estrategia de sombreado.

Se observa que la limitación de la temperatura del recinto resulta efectiva para los meses marzo y diciembre, de manera parcial en septiembre e innecesaria en invierno. Para estos últimos casos, se puede pensar en una estrategia de calefacción auxiliar, para elevar la temperatura del recinto. No obstante, si se compara la temperatura interior con la ambiente para los meses fríos (a trazos) se observa una importante diferencia entre ambas. Como contrapartida de ésta estrategia, sucede que la iluminación interior del recinto deberá ser de manera artificial dado el bloqueo del ingreso de la radiación hacia el interior. Las *horas de sol* dentro del recinto se ven considerablemente reducidas, como se observa en la Figura 17, para 5 días de simulación.

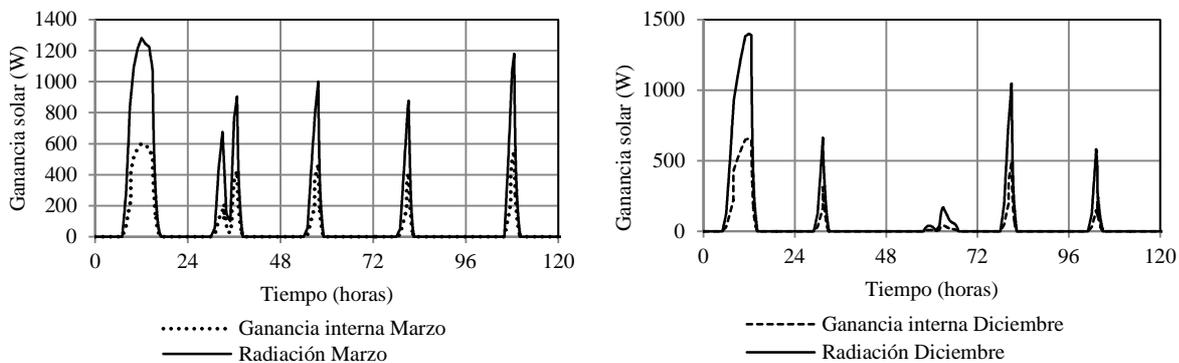


Figura 17. Curvas de ganancia solar en el interior de los recintos y potencia térmica incidente en ventana.

#### 4.2. Acondicionamiento activo

La segunda estrategia para controlar la temperatura en el interior del recinto se realiza mediante un acondicionador de aire dispuesto en el Simusol según el diagrama de la Figura 18, identificado con el bloque *ac* como un agregado al modelo original. El encendido del sistema de enfriamiento se controla con la temperatura del recinto. Este bloque

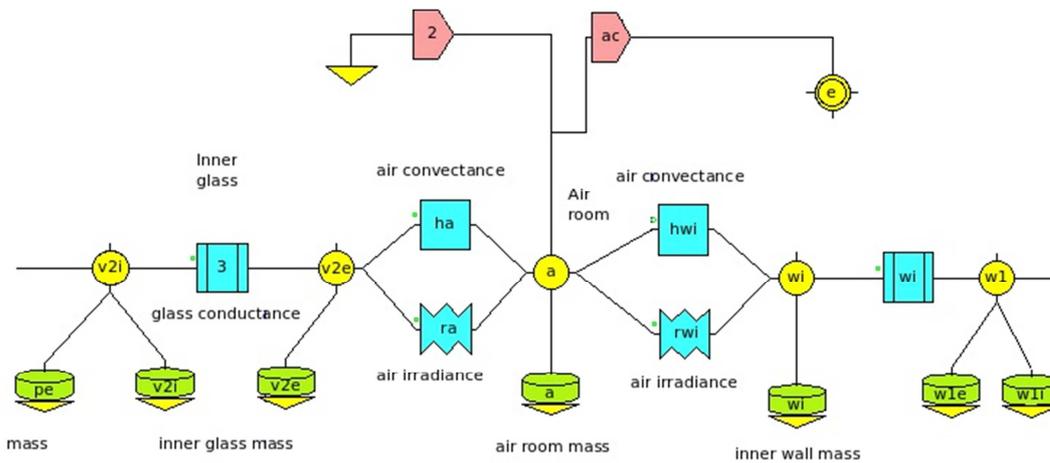


Figura 18. Sistema de control de temperatura mediante acondicionador de aire.

Al igual que en el caso de sombreado, la temperatura de control se establece en 26 °C y a partir de allí comienza a funcionar el sistema de acondicionamiento de aire. Puede verse en Figura 19 que si la ganancia solar es tal que produce un sobrecalentamiento en el interior del recinto, la temperatura del mismo resulta limitada por el equipo de refrigeración.

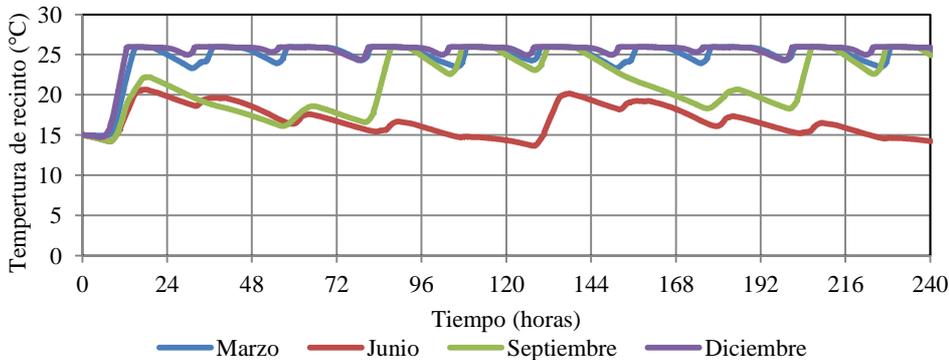


Figura 19. Temperaturas del recinto con limitación por aire acondicionado.

De manera indicativa, se muestra en la figura 20 que es posible computar el consumo de energía que se debe extraer para el acondicionamiento térmico, tomando como ejemplo los meses de Marzo y Diciembre nuevamente.

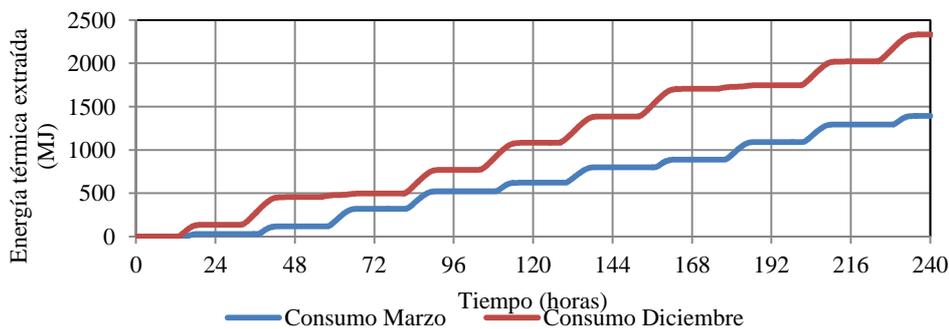


Figura 20. Energía térmica a extraer del recinto para control de temperatura.

El mes de diciembre es uno de los meses de mayor radiación solar disponible como se vio en la figura 2. Realizando un cálculo rápido de consumo térmico, se puede inferir en el consumo eléctrico asociado al equipamiento considerando un rendimiento de ciclo de 40%, para un consumo térmico de 2300 MJ en 10 días, el consumo eléctrico mensual será:

$$E_{\text{consumo}} = \frac{2300 \text{ MJ}}{10 \text{ días}} * 30 \text{ días} / 0.4 / 3.6 \frac{\text{kWh}}{\text{MJ}} \approx 5 \text{ kWh}$$

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una metodología para el estudio térmico de un recinto acondicionado mediante ganancia directa y almacenamiento térmico en materiales de cambio de fase. Particularmente se estudió el desempeño de una parafina cuya temperatura de fusión nominal es de 25 °C. Para llevar a cabo dicho estudio, se combinaron mediciones en laboratorio de las propiedades térmicas de la parafina, siendo la capacidad calorífica la más importante y necesaria para la simulación computacional, así como la transmitancia espectral, con cálculo numérico computacional realizando un modelo en Simusol. En cuanto a las condiciones climáticas se emplearon mediciones terrestres de radiación solar, velocidad de viento y temperatura ambiente. Esto resulta ventajoso dado que ajusta al modelo y lo coloca en un escenario cercano a la realidad de los fenómenos de transferencia energética que tienen lugar en estos tipos de sistemas de bioclimatización pasiva.

La temperatura del recinto puede ser regulada mediante la colocación de parafina en el intersticio de una ventana doblemente vidriada disponible en el mercado, sin mayores modificaciones en la estructura de la misma. Esto significa que se puede disponer de ésta tecnología sin mayores costo de materiales para estructuras fijas. Se determinó que la inercia térmica impuesta por el PCM es suficiente como para mantener la temperatura del recinto lo suficientemente estable después del medio día solar y durante el atardecer.

Además, se observó que resulta necesario plantear estrategias de control de temperatura mediante dispositivos que actúen directamente sobre la ganancia solar o bien sobre el aire interior del recinto. La primera medida resulta conveniente desde el punto de vista práctico pero tiene la desventaja que el sombreado demanda iluminar el interior del recinto con iluminación artificial o de otra fuente. La segunda medida resulta viable dada la facilidad de montaje del equipo de acondicionamiento pero trae aparejada la desventaja del consumo eléctrico.

Un análisis más profundo de performance térmica puede realizarse variando el tipo de sustancia empleada, por ejemplo, caracterizando y modelando una parafina que funde a 19 °C. O bien modificando la arquitectura del recinto en cuanto a los materiales empleados en los muros y cerramientos. Como alternativa se pueden emplear cámaras múltiples de distintos tipos de PCM e inclusive algunos intersticios rellenos con gases inertes como el Argón o compuestos de HF6.

Por último, para ajustar aún más el modelo térmico, resulta necesario llevar a la práctica la configuración de ventana aquí planteada y las mediciones correspondientes en puntos espaciales bien definidos. Cómo la transmitancia espectral se ve influenciada por el ángulo de incidencia solar, se propone a futuro un modelo que contemple tales ángulos incidentes, tanto en el vidrio exterior como en las sucesivas capas de PCM y vidrios considerando las reflexiones y absorciones internas en las superficies en contacto.

## 6. REFERENCIAS

- Alias D., Saravia L., Saravia D.. Simusol: simulating thermal systems using SCEPTRE and DIA. J. Free Software Free Know, 1 (2012), pp. 30–34.
- Cabeza L.F., Castell A., Barreneche C., De Gracia A., Fernández A.I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 15, 1675–1695.
- Duffie J. A., Beckman W. A. (2003). *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4<sup>th</sup> edition. John Wiley & Sons, INC. New York.
- Hernández A. (2003). Geosol: una herramienta computacional para el cálculo de coordenadas solares y la estimación de irradiación solar horaria. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 7, N° 2. ISSN 0329 – 5184.
- Ismail K. A.R., Salinas C. T., Henríquez J. R. (2008). Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows. *Energy and Buildings* 40, 710–719.

- Suriñach S., Baro M. D., Bordas S., Clavaguera N., Clavaguera – Mora M. T. (1992). La calorimetría diferencial de barrido y su aplicación a la Ciencia de Materiales. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 31 – 1, 11 – 17.
- Ushak S., Cruz M. J., Cabeza L. F., Grágeda M. (2016). Preparation and Characterization of Inorganic PCM Microcapsules by Fluidized Bed Method. Materials, 9, 24; doi:10.3390/ma9010024.

**ABSTRACT:** The present work studies the energetic potential of a certain phase-change materials (PCM): pure state paraffin, for being used in building climatization applications. The physical properties studied have been carried out through differential scanning calorimetry (DSC) over a specified volume and mass sample. Concerning the optical properties, the spectral transmittance was determined by a Licor LI-1800 spectro-radiometer, for the paraffin in both solid and liquid state. Finally a simulation of the thermal conditions for an enclosure and thermal isolated room were done in Simusol. The room had double-glazed window, orientated towards the North, with paraffin between both glasses. The case study was located for the climatic conditions of the city of Santiago de Chile, considering the characteristic days of each month.

**Keywords:** Phase Change Materials, Energy Efficiency, Building Thermal improvements, SIMUSOL.