



# **UNIÓN DE ASOCIACIONES DE INGENIEROS TÉCNICOS INDUSTRIALES Y GRADUADOS EN INGENIERÍA DE LA RAMA INDUSTRIAL DE ESPAÑA (UAITIE)**

**"CONVOCATORIA 2018"**

## **III PREMIO NACIONAL DE INICIACIÓN A LA INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA**

### **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA E INERCIA TÉRMICA EN EDIFICIOS MEDIANTE EL USO DE MATERIALES PCM**

**AUTOR/ES:**  
Alejandro Nicholas Sáez Mischlich  
Bruno Casino Remondo  
Miguel Seijo Martín

**BLOQUE TEMÁTICO:**  
Eficiencia energética

**NIVEL EDUCATIVO:**  
2º Bach

**COORDINADOR:**  
Blanca López Fernández y Cristina María Jiménez Leal  
IES. MARGARITA SALAS. MAJADAHONDA

Marzo 2018

# ÍNDICE

1.	RESUMEN .....	3
2.	OBJETIVOS e HIPÓTESIS DE TRABAJO .....	4
3.	MARCO TEÓRICO .....	4
3.1	CALOR LATENTE Y SENSIBLE.....	4
3.2	MATERIALES PCM.....	5
4.	MATERIALES, COMPONENTES Y PROGRAMACIÓN DEL SW .....	8
4.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA MAQUETA.....	8
4.2	MONTAJE PARA MEDICIÓN, CONTROL Y ACTUACIÓN.....	9
4.3	SOFTWARE DE CONTROL (SW). PROGRAMACIÓN.....	10
5.	EXPERIMENTOS REALIZADOS.....	14
5.1	PROCEDIMIENTOS REALIZADOS.....	14
5.2	EXPERIMENTO PREVIO A Y B: solidificación/fusión del pcm .....	15
5.3	EXPERIMENTO 1 (A y B): en ciclo solar, con aislante y de 24 horas .....	16
5.4	EXPERIMENTO 2 (A y B): en ciclo solar, sin aislante, de 36 horas.....	17
5.5	EXPERIMENTO 3 (A y B): en ciclo forzado, sin aislante, de 6 horas.....	18
6.	CONCLUSIONES.....	19
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	20

## 1. RESUMEN

La escasez y dependencia de los recursos energéticos no renovables[1] nos motiva a desarrollar tecnologías sostenibles capaces de almacenar energía de forma pasiva en el momento en que está disponible y de liberarla cuando sea requerida, desfasando en el tiempo la generación energética de su consumo. Los materiales PCM o Phase Change Materials son idóneos para almacenar energía de manera eficiente por su elevado calor latente y la posibilidad de elegir el rango de temperaturas de cambio de fase operativo según la aplicación deseada, todo ello optimizando la densidad de almacenamiento energético[2][3]. Energía que liberarán cuando las condiciones que propicien su cambio de fase inverso, se cumplan.

En este trabajo se analiza la mejora de la eficiencia energética en construcciones mediante el uso de un material PCM elegido en base a su temperatura de funcionamiento dentro de rangos del confort térmico humano, de manera que se moderen las fluctuaciones de temperatura en el interior del edificio con respecto a los cambios climatológicos. El objetivo es conseguir incrementar la inercia térmica de la construcción sin necesidad de implementar cerramientos de gran espesor ni de disponer de climatización activa, lo que reducirá el precio de la construcción así como la huella de carbono asociada.

Para ello, se diseñó una maqueta que simulaba una estancia interior de una vivienda así como el medio exterior climatológico al que está sometida, se forraron determinados paramentos con material PCM y se sometió a la maqueta a ciclos de temperatura, a través de un sistema de control diseñado en Arduino y programado en "C". Se tomaron medidas de las temperaturas alcanzadas en el interior de la maqueta bajo diferentes condiciones (con/sin PCM, con/sin aislante, bajo ciclos de temperatura naturales o forzados a través de una lámpara halógena) y se estudió el desfase de los picos de temperatura percibidos en el interior, así como la disminución de la oscilación térmica, corroborándose la efectividad del PCM como material termorregulador pasivo. El montaje electrónico así como el sistema programado de control y medidas se diseñaron para poder ser usados en el futuro en proyectos de mayor envergadura y/o con diferentes materiales PCM y distinta disposición de los mismos en los cerramientos.

## 2. OBJETIVOS e HIPÓTESIS DE TRABAJO

**Objetivo principal:**-Implementar un sistema para valorar la funcionalidad de un PCM como acumulador/liberador de energía por calor latente, aumentando de la inercia térmica de un habitáculo mediante una regulación térmica pasiva eficiente.

**Objetivos secundarios:** -Comprobar los rangos de temperatura de funcionamiento del PCM objeto de estudio y los tiempos necesarios para los cambios de estado sólido-líquido.

- Analizar la mejora de la eficiencia del PCM en presencia de otros aislantes térmicos.

- Diseñar un sistema de control de temperatura con placa Arduino, controlado mediante programas escritos en C, para el estudio del comportamiento del PCM en distintas condiciones y su monitorización en tiempo real mediante programas de Python para el seguimiento del desarrollo del experimento.

**Hipótesis de trabajo:** - El PCM sufrirá el cambio de fase en el rango de  $T^a$  indicadas por el fabricante, absorberá gran parte de la energía del ambiente durante su fusión y la liberará al solidificar, suavizará la oscilación térmica y por último, los tiempos de fusión y solidificación del PCM estarán en un orden de magnitud similar a los ciclos de enfriamiento y calentamiento a los que se ve sometido el edificio por la acción solar, en climas adecuados al uso para el que se ha diseñado el PCM (rangos  $T^a$ ).

## 3. MARCO TEÓRICO

### 3.1 CALOR LATENTE Y SENSIBLE

El cambio de fase de una sustancia es un cambio físico que consiste en la transición de un estado de agregación a otro, generalmente acompañada de una absorción o emisión de calor, pudiendo ser reversibles. El calor implicado en el cambio de estado (ganado o cedido en cada caso), se denomina **calor latente**, que es la energía que se requiere añadir o que se libera para producir dicho cambio, a temperatura constante. El **calor sensible** sin embargo es aquella energía que un sistema puede absorber del ambiente o ceder, gracias a una variación de temperatura y siempre que no haya cambio de fase. El calor se transmite al poner en contacto dos sistemas a diferentes temperaturas. Se llama "calor latente de fusión", a la energía necesaria para el cambio de estado sólido a líquido de 1 gramo de sustancia, **sin variación de**

**temperatura** (reduciendo las pérdidas energéticas en forma de calor). Este calor queda almacenado en los enlaces de la sustancia cuando se produce el cambio físico (o bien liberado si la sustancia pasa a una fase de menor cohesión).

### 3.2 MATERIALES PCM

Un material de cambio de fase, es aquel que, contando con un alto calor latente (fusión/solidificación), tiene una temperatura de cambio de fase en un rango estrecho, casi constante para evitar pérdidas energéticas en el proceso, y en valores adecuados para aplicaciones interesantes. Se considerará un material como PCM cuando el valor del calor latente sea suficiente para almacenar o liberar de manera eficiente energía térmica. La densidad de almacenamiento de calor y la energía acumulada mediante calor latente es muy superior a la conseguida por calor sensible, lo que reduce la cantidad de material a emplear.



Figura 1. Presentación del PCM  
Fuente: Elaboración propia

El material PCM adecuado a nuestro proyecto será aquel que, cumpliendo el resto de requisitos mencionados, tenga temperaturas de fusión y solidificación dentro del rango de confort térmico humano, 20-28°C, como por ejemplo, el ClimSel°C24[4] de la empresa sueca Climator, macroencapsulado en bolsas de aluminio. A continuación reproducimos las hojas de especificaciones técnicas del material:

ClimSel C24 product specification sheet  
150610-1  
www.climator.com

Typically used for temperature stabilized transports of refrigerated products. Also used for passive cooling of buildings and of people/animals.

**Typical temperature stabilization span**  
24°C ↔ 27°C  
75°F ↔ 81°F

**Product description**  
ClimSel™ C24 is a salt hydrate based Phase Change Material that works by either the charging or discharging of energy at different temperatures. ClimSel™ C24 is delivered in various sizes of aluminium foil pouches. Its main components are sodium sulphate, water and additive.

**Physical data**

Phase change temperature: Solid	24°C / 75°F
Phase change temperature: Liquid	27°C / 81°F
Latent heat of fusion (see curve)	40 Wh/kg – 140 kJ/kg
Density, granular	1.4 kg/litre
Thermal conductivity: Solid	0.74 W/m/K
Thermal conductivity: Liquid	0.93 W/m/K

**Estimated functionality time**  
If the products are handled correctly, and the packaging is kept uncompromised, the product will continue to cycle as intended over time, with no known lifetime limit.  
Note: ClimSel™ C24 will only work as declared for as long as the pouch is in tact.

**Usage guidelines**

- Recommended storage temperature: 10-20°C / 50-60°F.
- Preparation before use depends on application conditions.
- Handle the ClimSel™ C24 pouch with care and do not bend when solid.
- Do not use damaged pouch, as the product functionality will be compromised.

**Damaged products**

- If damaged pouch is suspected, it shall be thoroughly inspected before use.
- Damage of products shall be discarded and treated in accordance with federal, state and local requirements for EWC (European Waste code) – 0603M.

Climator Sweden AB  
Majavägen 15  
SE-541 34 Skövde  
SWEDEN  
Phone: +46 (0)500 40 23 50  
Fax: +46 (0)500 41 40 42  
E-mail: climator@climator.com

© Climator Sweden AB, 2017. Climator and ClimSel are registered trademarks of Climator Sweden AB.

ClimSel C24 product specification sheet  
150610-1  
www.climator.com

**Phase change performance curves**

**Part enthalpy**

**Enthalpy**

Change curve after use performance during melting (to be read from left to right)  
Blue curve shows performance during crystallisation (to be read from right to left)

Climator is one of the world's leading companies within PCM and temperature stabilization solutions.

Through our know-how, PCM expertise and innovation power, we develop project based solutions that solve our customers' temperature stabilization and control problems.

We operate within four application areas:

Climator Sweden AB  
Majavägen 15  
SE-541 34 Skövde  
SWEDEN  
+46 (0)500 40 23 50  
www.climator.com  
climator@climator.com

© Climator Sweden AB, 2017. Climator and ClimSel are registered trademarks of Climator Sweden AB.

Ciertos cerramientos utilizados en construcción, como los muros de hormigón, mejoran el comportamiento energético de los edificios permitiendo amortiguar la variación de temperatura entre el interior y el exterior de una estancia, así como desfasando en el tiempo los picos de temperatura, es decir, controlando la velocidad con la que el cerramiento absorbe la energía térmica recibida del exterior (o la cede). Esta propiedad es la inercia térmica y depende de la masa térmica, del calor específico de los materiales empleados en el cerramiento, del coeficiente de conductividad térmica de dichos materiales y su densidad, permitiendo una mayor estabilidad de la temperatura del interior de los habitáculos, normalmente mediante cerramientos de gran masa. De esta manera se consigue una menor dependencia del uso de sistemas activos de climatización interior, mejorando el rendimiento energético de los edificios y reduciendo las emisiones contaminantes.

Cuando la radiación solar incide en el cerramiento exterior, su temperatura se eleva y se produce una transmisión de calor hacia el interior del cerramiento. Podemos entender este proceso como una onda de energía que se va desplazando a lo largo del día según la incidencia solar va variando y

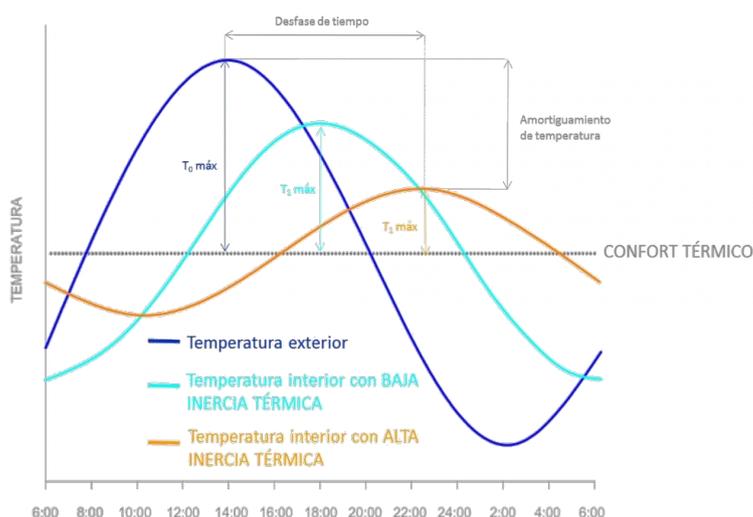


Figura 2. Gráfica inercia térmica Fuente: <https://goo.gl/IbEUyq>

que se verá replicada en el interior del edificio, si bien, con una cierta amortiguación de su amplitud pico y un desfase en el tiempo, debido a la inercia térmica que presenta el edificio. Se trata pues de que el edificio permanezca durante más tiempo en rangos de temperatura dentro del confort térmico humano sin necesidad de hacer uso de sistemas de climatización activos.

En este sentido, tradicionalmente se han venido implementando en las construcciones cerramientos de gran masa térmica (como el hormigón, piedra, ladrillo etc) combinados con otros de características aislantes como las placas de

poliestireno expandido, con objeto de mejorar las condiciones de habitabilidad de los locales, reduciendo la demanda energética. Pero se precisa de muros de gran espesor como ya hemos indicado, lo que encarece la construcción, la hace más pesada además de influir negativamente en la huella de carbono generada con la fabricación de dichos materiales.

Este tipo de soluciones se basan en el aprovechamiento del calor específico de los materiales utilizados. Sin embargo, ya hemos indicado que los valores de calor latente inherentes a determinados materiales, son mucho más elevados que el del calor sensible para el mismo material, al necesitar adquirir suficiente energía como para llegar al cambio de fase.

Si somos capaces de encontrar materiales con alto calor latente que puedan llegar a su cambio de fase en rangos de temperatura en torno al rango de confort térmico humano, y los podemos incorporar al sistema constructivo de la vivienda, se convertirían en grandes acumuladores/liberadores de energía, ya que sería acumulada mayoritariamente en forma de calor latente. De esta manera, podríamos reducir el espesor de los muros de hormigón de la vivienda, disminuyendo los costes constructivos y adaptando la edificación a los modernos sistemas constructivos sin renunciar a la inercia térmica propia de muros de mayor espesor. Esto es lo que pueden aportar los materiales PCM en la mejora de la inercia térmica de las estancias sin necesidad de incrementar sustancialmente la masa térmica de los cerramientos.

Para implementar este proyecto, nos resultó sumamente difícil conseguir una muestra de material PCM suficientemente grande como para forrar todo el habitáculo de la maqueta que construimos (simulando una vivienda); los proveedores nos exigían la compra de pedidos mínimos que rondaban presupuestos a partir de los 800€, lo que era totalmente inviable con nuestros medios económicos. En ese sentido, agradecer enormemente la disponibilidad del proveedor sueco *Climator* para proporcionarnos dos muestras gratuitas de su PCM modelo *ClimSel*

C24, macroencapsulado, que decidimos incorporar en nuestra maqueta en el cerramiento superior, aislando los cerramientos laterales. La incidencia de la radiación solar (natural o forzada a través de una lámpara halógena) se produjo por tanto principalmente a través del cerramiento protegido con las planchas de material PCM. Además indicar, que nos hubiera gustado disponer de material PCM microencapsulado para haberlo incorporado en el yeso y recubrir con ello las paredes interiores del habitáculo, para experimentar las diferencias percibidas entre soluciones constructivas empleando PCM macro o microencapsulado.

Por último, entendemos que la experimentación que hemos tenido que realizar debía circunscribirse al uso del material *ClimSel C24*, que tiene una temperatura de fusión de 27°C, la cual será difícil de alcanzar en climas fríos o bien en los fríos inviernos de nuestra península. Así pues, la solución constructiva ideal pasaría por la incorporación en los muros de dos capas diferentes de material PCM con distinta temperatura de fusión, que pudieran adaptarse mejor tanto a la temperatura de verano como a la de invierno. Esto explica que intentáramos realizar un experimento muy riguroso en cuanto a las posibilidades de poder ser readaptado para el empleo de otro tipo de materiales PCM si se consigue en un futuro que sean aportados por otros fabricantes.

## **4. MATERIALES, COMPONENTES Y PROGRAMACIÓN DEL SW**

### **4.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA MAQUETA**

Para comprobar la funcionalidad del PCM indicado en aplicaciones de regulación térmica en el hogar, se construyó una maqueta simulando habitáculos en los que poder analizar la influencia de las condiciones ambientales térmicas externas (reales o forzadas), midiendo las variaciones resultantes en el interior del habitáculo simulado, en experimentos realizados con y sin intervención del PCM como regulador térmico y bajo la influencia o no de aislantes térmicos.

La maqueta presenta dos habitáculos en forma de un cubo o estancia interior (con paredes construidas con placas dobles de pladur de tamaño 30\*30\*30cm), insertada dentro de otro de mayor tamaño (construido con planchas de aglomerado de

40\*40\*60cm) y que simula el exterior. La maqueta se verá sometida a ciclos de temperatura (reales o forzados), que provocarán los ciclos de carga y descarga del PCM, activando su funcionamiento. Ambos cubos están provistos de tapa móvil para poder colocar sendos sensores de temperatura Arduino en su interior. En la tapa móvil exterior se coloca una fuente de luz halógena que se controlará externamente mientras en la tapa interior existe una cámara donde podrá colocarse el PCM (dos planchas de 1kg cada una) o no, según queramos medir su influencia en la regulación térmica. Entre los paramentos de pladur del cubo interior, se insertan planchas de poliestireno expandido (PS) que actuará como aislante en algunos experimentos.



Figura 3. Detalle de construcción de la maqueta, de izq a dcha: cubo exterior, cubo interior aislado con poliestireno, tapa del cubo interior con cámara para alojar PCM, tapa del cubo exterior con lámpara halógena (fuente forzada).  
Fuente: Elaboración propia

## 4.2 MONTAJE PARA MEDICIÓN, CONTROL Y ACTUACIÓN

Estudiaremos el PCM realizando experimentos tomando cada cierto tiempo medidas de las temperaturas registradas tanto en la maqueta interior como en la exterior y procesando los datos para compararlos, tanto en experimentos a temperatura ambiente como con temperatura forzada, con y sin PCM. Para ello se montaron los siguientes componentes según el circuito indicado en la figura 4:

**Dos Sensores de humedad y temperatura DHT22:** El sensor dispone de un procesador interno para medir temperaturas dentro del rango operativo de los experimentos y arrojar una medida mediante una señal digital, que será enviada a través de la protoboard a la placa Arduino y de ella al PC.[5]



Sensor DHT22  
Fuente: <https://goo.gl/93Yxba>

**Placa microcontroladora Arduino UNO Rev 3.** Arduino es una plataforma electrónica de código abierto que proporciona una placa microcontroladora que incluye una salida para conectar a cable USB por donde, además de alimentarse, envía las mediciones al PC. [6]



Placa Arduino Uno 3 Rev  
Fuente: <https://goo.gl/OktSnt>

**Lámpara halógena 80 W:** Se incorporó al circuito electrónico para suministrar la energía térmica necesaria en los experimentos realizados con temperaturas forzadas aportando al sistema la energía necesaria para inducir a un ciclo de calentamiento del PCM. Se alimentó con 220 V y se montó sobre una estructura cóncava metálica y reflectante, que amplificaba y orientaba la radiación en la dirección adecuada. Su funcionamiento fue regulado por un



Lámpara halógena 80W  
Fuente: Elaboración propia

relé, que la activó o desconectó según los requerimientos de cada etapa de la experimentación.

**Relé 5V:** Interruptor electromagnético para el control de la lámpara halógena. Dispone de tres pines, conectados a la controladora de Arduino a través de la placa protoboard. Se realizó un código en C para controlar el relé según los ciclos de calentamiento necesarios, para encender y apagar la bombilla.[7]



**Relé** Fuente: *Elaboración propia*

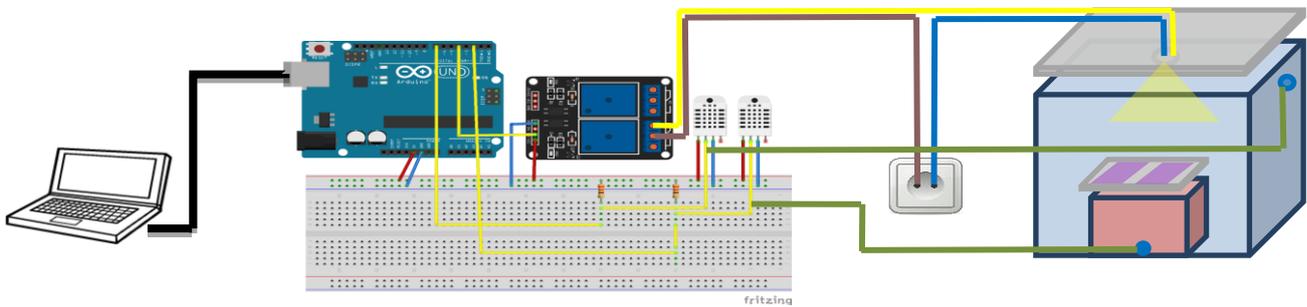
**Placa Protoboard:** Se utilizó una placa de pruebas (Protoboard) para la conexión de los cables de datos de Arduino y de los componentes electrónicos

**Montaje de conexiones sobre Protoboard**

Fuente: *Elaboración propia*



**Ordenador** con soporte para todos los programas utilizados: SW Arduino, C, IDLE (Integrated Development Environment for Python, entorno de programación de Python). Se utilizó un PC como dispositivo para almacenar y ejecutar los programas necesarios para el registro de datos (T) y el control programado de los experimentos y además conector **USB** para volcar los datos de la placa Arduino al PC y mandar los comandos para generar los ciclos de temperatura.



**Figura 4. Esquema de montaje electrónico** Fuente: *Elaboración propia*

### 4.3 SOFTWARE DE CONTROL (SW). PROGRAMACIÓN

El montaje electrónico expuesto es capaz de registrar las variaciones de temperaturas medidas y enviarlas por un puerto USB a un PC, donde distintos software (descritos a continuación y esquematizados en la tabla 1) almacenarán y analizarán los datos enviados. Recalamos que no siempre se van a dar las condiciones ambientales naturales (radiación solar) que hagan que el PCM alcance los ciclos de fusión y solidificación deseados (absorbiendo y cediendo respectivamente calor del/al ambiente). Por ese motivo, algunos experimentos tuvieron que realizarse con la lámpara halógena como fuente de energía térmica artificial, requiriendo un SW de control mucho más complejo (adjunto a continuación, código en amarillo) que para los experimentos en los que tan solo se recogen los datos de los sensores y no necesitan generar un ciclo de temperatura. Para establecer dichos ciclos mediante la lámpara, se diseñó un SW de control para la placa Arduino.

Este SW y el montaje de la placa Arduino forman un sistema de control de temperatura. Está escrito en C y se basa en la lectura de los sensores digitales de temperatura para accionar un relé conectado a la lámpara halógena que controla el apagado y encendido de la misma, regulando la temperatura del recinto exterior. Esto se consigue generando ciclos artificiales de temperatura, caracterizados por la temperatura mínima y máxima y por el periodo de calentamiento y enfriamiento. La temperatura del recinto exterior no debía variar bruscamente sino de forma paulatina y dentro de ciertos rangos determinados tales que provoquen los ciclos del PCM (T solidificación y fusión del PCM). También debíamos encontrar los parámetros temporales adecuados para fijar los periodos en los que producir los ciclos térmicos (experimento previo A y B). Conocidos estos parámetros, el sistema de control establece un ciclo de calentamiento y enfriamiento siguiendo una función lineal con el tiempo, registrando la temperatura del habitáculo y activando el relé en función de la temperatura exterior registrada y la deseada según el ciclo de control.

Para el análisis y almacenamiento de los datos se desarrolló un código (utilizando PYTHON) que recibe la información sobre las temperaturas y nos permite comprobar visualmente el comportamiento del sistema de control y las temperaturas del habitáculo, mostrando una gráfica en tiempo real con la evolución temporal de todas las variables descritas. Por último, se desarrolló un código que permite obtener las gráficas de la evolución temporal de las temperaturas además de otros parámetros que caracterizan los experimentos (pendientes de las curvas y áreas bajo las mismas). Este SW resulta crucial para entender y caracterizar los fenómenos que se dan durante el experimento. En la tabla 1 se muestra un esquema de los códigos propios desarrollados y su función

A continuación se muestran dos de los códigos utilizados durante la realización del proyecto. En amarillo se encuentra el código de toma de datos de los sensores de temperatura (en lenguaje de programación "C") y en azul el código de guardado de datos y de muestra de dichos datos en tiempo real a través de una gráfica (en lenguaje de programación "Python").

```

#include <DHT.h>

#define DHTPIN 2 // what pin we're connected to
to measure temperature inside the box
#define DHTPIN_outside 7 // what pin we're
connected to to measure temperature outside the box
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22 (AM2302)
#define fan 5
#define RelePIN 4
intmaxHum = 60; //for the sensor
intmaxTemp = 45; //for the sensor

float maxTemperature = 33; // max temperature of
the cycle
float minTemperature = 23; // min temperature of the
cycle
intisTemperatureLessThanMinTemperature = 0; // if at
the start of the cycle the temperature is less
// than the cycle's min
temperature we need to put on the heater
// and wait until we
reach minTemperature
float startTime = 0; // Real time at
which we start the cycle
intfirstLoop = 1;
intfirstLoopCooling = 1; // Are we in the
first loop of the cooling? Then we might need to
redefine the cooling slope
int heating = 1; // Are we heating
or cooling?
intstartedHeating = 1; // Did the heating
cycle start?
float heatingCycleTime = 10800; // Cycle
time to heat or cool in s
float temperatureSlope = (maxTemperature -
minTemperature)/heatingCycleTime;
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
DHT dht_outside(DHTPIN_outside, DHTTYPE);
intval;
inttempPin = 0;
void setup(){
pinMode(fan, OUTPUT);
// Open serial connection.
Serial.begin(9600);
dht.begin();
dht_outside.begin();
pinMode(RelePIN, OUTPUT);
}
void calculateOnOffRele()
{
}
float calculateDesiredTemperatureHeating(){
float timeElapsed = millis();
float realCycleTime = timeElapsed - startTime;
realCycleTime = realCycleTime / 1000;
float expectedTemperature =
temperatureSlope*realCycleTime + minTemperature;
return expectedTemperature;
}
float calculateDesiredTemperatureCooling(){
float timeElapsed = millis();
float realCycleTime = timeElapsed - startTime;
realCycleTime = realCycleTime / 1000;
float expectedTemperature =
temperatureSlope*realCycleTime + maxTemperature;
return expectedTemperature;
}
void printTemperatureInside(float t){
Serial.print(" insideTemperature = ");
Serial.print(t);
Serial.print(" *C");
}

```

```

void printTemperatureDesired(float t){
Serial.print(" desiredTemperature = ");
Serial.print(t);
Serial.print(" *C");
}
void printTemperatureOutside(float t){
Serial.print(" outsideTemperature = ");
Serial.print(t);
Serial.print(" *C");
}
void loop(){
float h,t,t_outside;
h = dht.readHumidity();
// Read temperature as Celsius
t = dht.readTemperature();
t_outside = dht_outside.readTemperature();
if (isnan(h) || isnan(t) || isnan(t_outside)) {
Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
return;
}
float currentTime = millis()-startTime;
if( (currentTime/1000-startTime/1000)
>heatingCycleTime&&startedHeating == 1) // have
we passed the heating time?
{
heating = 0; // stop the heating cycle
startedHeating = 0; // stop the heating cycle
Serial.print("Starting cooling");
Serial.println();
}
if(heating == 1) // we are heating
{
// here we might be in the situation where during
the start the temperature is less than the expected
// therefore we need to start heating and wait till
the temperature is higher than the min
// This also means that the starting time of our
cycle is different to 0 and needs to be calculated
// This starting time is stored in startTime
if(t_outside>minTemperature)
{
startedHeating = 1;
float desiredTemperature =
calculateDesiredTemperatureHeating();
Serial.print(" Time = ");
Serial.print(millis()/1000);
//Serial.println();
printTemperatureDesired(desiredTemperature);
printTemperatureInside(t);
printTemperatureOutside(t_outside);
Serial.println();
if(t_outside<desiredTemperature)
{
Serial.print("Switching on rele");
Serial.println();
digitalWrite(RelePIN, HIGH);
}else
{
Serial.print("Switching off rele");
Serial.println();
digitalWrite(RelePIN, LOW);
}
}else{
// wait until we have the min temperature
startTime = millis();
digitalWrite(RelePIN, HIGH);
Serial.print(" Time = ");
Serial.print(millis()/1000);
float desiredTemperature =
calculateDesiredTemperatureHeating();
printTemperatureDesired(desiredTemperature);
printTemperatureInside(t);
}
}

```



**Tabla 1. Esquema de los códigos desarrollados** Fuente: *Elaboración propia*

<b>Códigos desarrollados para experimentos realizados con fuente natural de energía (solar)</b>		
<b>SW-A</b>	<b>SW EN C PARA ARDUINO</b>	<b>medirT</b>
	Recoger datos enviados por sensores al PC a través de puerto USB: Tint y Text cada 10 segundos	
<b>SW-B</b>	<b>SW EN PHYTON SOBRE IDLE</b>	<b>mostrarT</b>
	Guardar valores recibidos en un formato compatible con Excel y mostrarlos en tiempo real, en forma de tabla y de gráfica	
<b>SW-C</b>	<b>SW EN PHYTON SOBRE IDLE</b>	<b>generarGráficaT</b>
	Generar gráfica (Text/Tint, t) a partir de los datos almacenados y guardarla como imagen	
<b>SW-D</b>	<b>SW EN PHYTON SOBRE IDLE</b>	<b>mostrarPendienteGráficaT</b>
	Calcular distintos parámetros del experimento basados en el cálculo de pendientes parciales sobre las gráficas de evolución temporal de los diferentes datos registrados en diferentes intervalos Calcular coeficientes de relación entre pendientes Text/Tint=coeficiente “alfa”	
<b>Códigos para experimentos realizados con fuente energía térmica forzada (bombilla accionada por relé)</b>		
<b>SW-α</b>	<b>SW EN C PARA ARDUINO</b>	<b>medirTforzado</b>
	Recoger datos enviados por sensores al PC a través de puerto USB: Tint ,Tdeseada, Text cada 10seg	
	Calcular T deseada teórica en cada momento , comparar con Text real y el ciclo en el que nos encontramos para accionar el relé	
	Bucle hasta terminar un ciclo completo de carga y descarga	
<b>SW-β</b>	<b>SW EN PHYTON SOBRE IDLE</b>	<b>mostrarTforzado</b>
	Guardar valores recibidos en un formato compatible con Excel y mostrarlos en tiempo real, en forma de tabla y de gráfica	
<b>SW-γ</b>	<b>SW EN PHYTON SOBRE IDLE</b>	<b>generarGráficaTforzado</b>
	Generar gráfica (Text/Tint/Tdes, t) a partir de los datos almacenados guardarla como imagen	
<b>SW-δ</b>	<b>SW EN PHYTON SOBRE IDLE</b>	<b>mostrarPendienteGráficaTforzado</b>
	Calcular distintos parámetros del experimento basados en el cálculo de áreas bajo las gráficas de la evolución temporal de los distintos datos registrados en diferentes intervalos Calcular coeficientes de relación entre las áreas Tint/Text=coeficiente “Beta”	

## 5. EXPERIMENTOS REALIZADOS

### 5.1 PROCEDIMIENTOS REALIZADOS

Se diseñaron cinco experimentos diferentes para medir la efectividad del PCM como regulador térmico en el habitáculo interior. Los parámetros que variaron fueron la fuente de energía térmica (ambiental (solar) o forzada (lámpara halógena), el uso o no del material PCM regulador y la presencia o no de material aislante adicional (plancha de poliestireno PS, simulando aislante de la vivienda), así como la duración del experimento y el lugar en el que se realizó. Además, se midieron experimentalmente los tiempos de fusión y solidificación del PCM, necesarios para parametrizar los ciclos de temperatura programados. Para ello, se dispusieron en el interior de ambos cubos de la maqueta sensores de temperatura y bajo la tapa del cubo exterior, la lámpara. Se conexiónó este sistema al circuito de control externo incluyendo el PC. Sobre el PC se corrieron los programas de SW correspondientes a cada experimento para recoger las temperaturas medidas en cada instante (cada 10s), así como para forzar los ciclos de temperatura en el experimento 3. Se llevaron

a cabo pruebas con ciclos de temperatura en condiciones atmosféricas reales y forzadas, para obligar al PCM a entrar en ciclos de carga y descarga. Se analizaron y compararon los diferentes resultados (utilizando el código *mostrarPendienteGraficaT* y *TForzado*) en cada una de las disposiciones con objeto a determinar la influencia del PCM como regulador en el cubo interior.

**Tabla 2. Esquema de los experimentos desarrollados** Fuente: *Elaboración*

	Exp. Previo	Exp. Previo	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
	A (tsolid)	B (tfus)	A	B	A	B	A	B
Maqueta	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
PCM	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No	Sí	No
Fuente Ener	Aire Acond	Solar	Solar	Solar	Solar	Solar	Artificial	Artificial
Poliestireno	No	No	Sí	Sí	No	No	No	No
Tint °C	-	-	27.7	27.6	23.3	22.6	25.3	25.9
Text °C	-	-	27.5	27.5	23.5	19.8	25.2	25.8
Duración(h)	3/4	2.5	24	24	36	36	6	6

Para comparar los resultados se definen los parámetros  $\alpha$  (pendiente de la curvaText/ pendiente curvaTint) y  $\beta$  (Área BajoCurvaTint/ Área BajoCurvaText) ambos en un determinado intervalo, siguiendo el método analítico propuesto que se indica en la figura 5. Según hemos definido dichos parámetros, cuanto más se acerque  $\alpha$  a 1 (pendientes de las curvas de  $T^a$  interior y exterior similares), menor efecto termorregulador en el cerramiento. Del mismo modo, si beta se aproxima a 1, querrá decir que las áreas bajo las curvas de  $T^a$  serán similares, con la misma conclusión: no se apreciará efecto termorregulador en nuestra maqueta interior.

$$\begin{array}{l}
 m_{\text{exterior}} = \Delta T / \Delta t \\
 m_{\text{interior}} = \Delta T / \Delta t \\
 \alpha = m_{\text{exterior}} / m_{\text{interior}}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{si } \alpha \rightarrow \infty \rightarrow \checkmark \\
 \text{si } \alpha \rightarrow 1 \rightarrow \times
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 A_{\text{interior}} = \int_1^2 f(x) dx \\
 A_{\text{exterior}} = \int_1^2 g(x) dx \\
 \beta = A_{\text{interior}} / A_{\text{exterior}}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{si } \beta \rightarrow 0 \rightarrow \checkmark \\
 \text{si } \beta \rightarrow 1 \rightarrow \times
 \end{array}$$

**Figura 5.** Parámetros alfa (experimentos con sol) y beta (experimento forzado), cálculo y significado. Fuente: *Elaboración propia*

## 5.2 EXPERIMENTO PREVIO A Y B: solidificación/fusión del pcm

Con objeto de medir el tiempo de solidificación (Previo A), se colocó el PCM en estado líquido en un recinto cerrado (habitación pequeña) con temperatura inicial de 24,9 °C y se forzó al enfriamiento progresivo del recinto con una fuente de frío (aparato de aire acondicionado), que se mantuvo en funcionamiento hasta que se produjo el cambio de estado en toda la masa del PCM. Se hizo un seguimiento por observación directa del estado del material y de la temperatura del recinto. El PCM tardó 45 minutos en solidificar completamente. Para medir el tiempo que tarda en

fundir el PCM, se colocó en estado sólido en el mismo recinto cerrado con una temperatura inicial de 28,3°C. Se hizo un seguimiento por observación directa del estado del material. El PCM tardó 2 horas y 30 minutos en fundir completamente. Conocer el orden de magnitud de estos tiempos era necesario para plantear los experimentos en los que se sometió a la maqueta al ciclo forzado de temperatura.

### 5.3 EXPERIMENTO 1 (A y B): en ciclo solar, con aislante y de 24 horas

#### Experimento 1A

Con PCM  
Con aislante (PS)  
Fuente de energía: solar  
T inicial interior: 27.7°C  
T inicial exterior: 27.5°C  
Duración: 24 horas

#### Experimento 1B

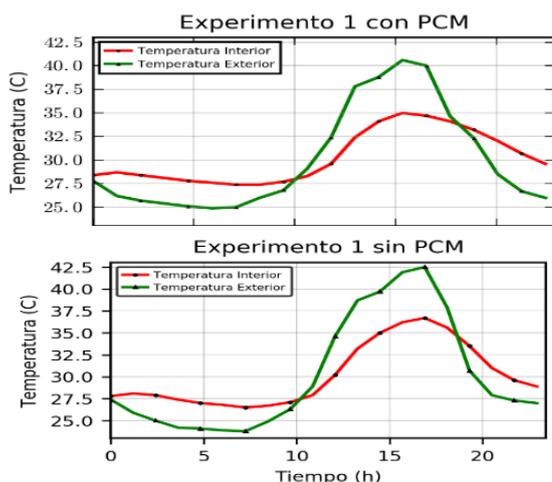
Sin PCM  
Con aislante (PS)  
Fuente de energía: solar  
T inicial interior: 27.7°C  
T inicial exterior: 27.5°C  
Duración: 24 horas

#### Experimento 1

Realizado durante el mes de Julio en una localidad de Alicante, cercana al mar.

Tabla 3. Resultados numéricos del experimento y análisis de parámetros Fuente: Elaboración propia

		1A Con PCM	1B Sin PCM
T <sup>o</sup> media exterior (°C)		30.122	30.265
T <sup>o</sup> media interior (°C)		30.344	30.257
tiempo (h) [11, 12.5] Tramo 1	m <sub>exterior</sub>	4.596	4.796
	m <sub>interior</sub>	1.798	2.198
	$\alpha_1$	<b>2.555</b>	<b>2.181</b>
tiempo (h) [16, 16.5] Tramo 2	m <sub>exterior</sub>	1.00	0.401
	m <sub>interior</sub>	0.40	0.401
	$\alpha_2$	<b>2.5</b>	<b>1</b>
tiempo (h) [19.5, 20] Tramo 3	m <sub>exterior</sub>	-3.010	-2.608
	m <sub>interior</sub>	-1.204	-2.408
	$\alpha_3$	<b>2.5</b>	<b>1.083</b>



Figuras 6,7. Resultados gráficos del experimento Fuente: Elaboración propia

En 1A (con PCM) percibimos que las temperaturas del recinto interior (rojo) mínimas y máximas están más próximas entre sí que en el 1B, pudiendo concluir que el PCM actúa aumentando la inercia térmica gracias a su calor latente. Se observa en la gráfica el amortiguamiento en los picos de T<sup>a</sup> medida en el interior. Además, en los intervalos de tiempo estudiados, los coeficientes  $\alpha$  obtenidos (descritos en la figura 5) muestran una menor oscilación de la temperatura (pendientes de las curvas-m-, menos parejas -figuras 6,7) en el experimento 1A (con PCM), lo que se traduce en un efecto positivo del PCM como regulador térmico pasivo y corrobora el aumento de inercia térmica.

## 5.4 EXPERIMENTO 2 (A y B): en ciclo solar, sin aislante, de 36 horas

### Experimento 2A

Con PCM  
Sin aislante (PS)  
Fuente de energía: solar  
T inicial interior: 23.3°C  
T inicial exterior: 23.5°C  
Duración: 36 horas

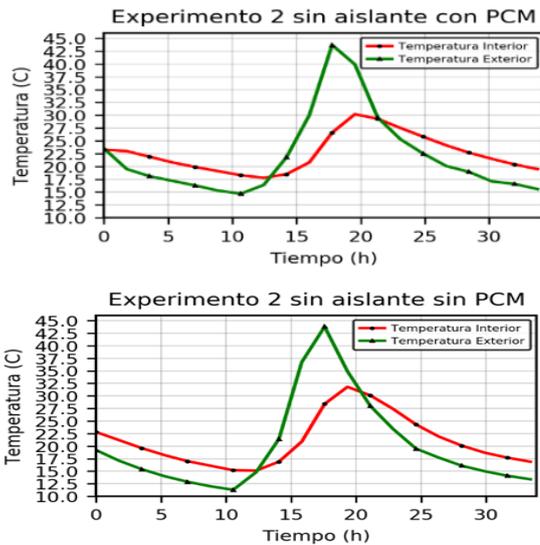
### Experimento 2B

Sin PCM  
Sin aislante (PS)  
Fuente de energía: solar  
T inicial interior: 22.6°C  
T inicial exterior: 19.8°C  
Duración: 36 horas

### Experimento 2

Realizado durante el mes de septiembre en una localidad de la sierra noroeste de Madrid.

Tabla 4. Resultados numéricos del experimento y análisis de parámetros Fuente: Elaboración propia



Figuras 8, 9 Resultados gráficos del experimento. Fuente: Elaboración propia

En estos dos experimentos puede observarse mayor variación de las temperaturas día-noche (en parte también debida a que nos encontramos en un clima más extremo), lo que nos permite apreciar mejor la acción del PCM, así como el efecto del calor sensible, al extender la prueba durante un periodo más prolongado (36 horas). De igual manera, nos asegurábamos que el PCM llegara a solidificar ( $T^a < 24^{\circ}\text{C}$ ). Se observa en la gráfica el amortiguamiento en los picos de  $T^a$  medida en el interior así como el desfase en el tiempo entre los picos de  $T^a$  exterior e interior, más acusado en el experimento con PCM. No obstante, y con objeto de realizar un análisis numérico cuantitativo en los intervalos de tiempo estudiados, se extrajeron los valores de los coeficientes  $\alpha$  (descritos en la figura 5), concluyendo que existe menor oscilación térmica en el experimento 2A (con PCM), es decir, las pendientes de ambas curvas son más diferentes que en el caso 2B, lo que se traduce en un efecto positivo del PCM como regulador térmico pasivo y corrobora el aumento de inercia térmica especialmente en cerramientos desprovistos de otros aislamientos significativos (PS retirado).

		Experimento 2A Con PCM	Experimento 2B Sin PCM
$T^a$ media exterior ( $^{\circ}\text{C}$ )		22.270	20.257
$T^a$ media interior ( $^{\circ}\text{C}$ )		22.616	21.084
tiempo (h) [13,5, 14] Tramo 1	$m_{\text{exterior}}$	3.191	3.789
	$m_{\text{interior}}$	0.598	1.196
	$\alpha_1$	<b>5.333</b>	<b>&gt; 3.166</b>
tiempo (h) [20, 21] Tramo 2	$m_{\text{exterior}}$	-4.701	-3.601
	$m_{\text{interior}}$	-0.700	-1.300
	$\alpha_2$	<b>6.714</b>	<b>&gt; 2.769</b>
tiempo (h) [24, 25] Tramo 3	$m_{\text{exterior}}$	-1.496	-1.795
	$m_{\text{interior}}$	-0.897	-1.695
	$\alpha_3$	<b>1.666</b>	<b>&gt; 1.058</b>

## 5.5 EXPERIMENTO 3 (A y B): en ciclo forzado, sin aislante, de 6 horas

### Experimento 3A

Con PCM  
Sin aislante (PS)  
Fuente de energía: artificial  
T inicial interior: 25.3°C  
T inicial exterior: 25.2°C  
Duración: 6 horas

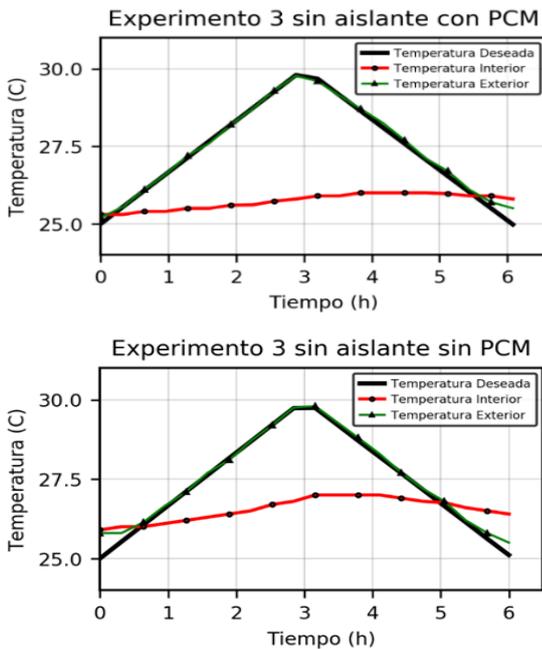
### Experimento 3B

Sin PCM  
Sin aislante (PS)  
Fuente de energía: artificial  
T inicial interior: 25.9°C  
T inicial exterior: 25.8°C  
Duración 6 horas

### Experimento 3

Realizado durante el mes de Octubre en el sótano de una vivienda.

**Tabla 5. Resultados numéricos de los experimentos y análisis de parámetros.** Fuente: *Elaboración propia*



**Figuras 10 y 11. Resultados gráficos del experimento.** Fuente: *Elaboración propia*

		Experimento 3A Con PCM	Experimento 3B Sin PCM
T <sup>a</sup> media deseada (°C)		27.493	27.526
T <sup>a</sup> media interior(°C)		25.737	26.567
T <sup>a</sup> media exterior(°C)		27.561	27.619
tiempo (h) Tramo 1 [2, 2.5]	A interior	12.769	13.266
	A exterior	14.315	14.316
	β <sub>1</sub>	0.891 <	0.922
tiempo (h) Tramo 2 [3.5, 4]	A interior	12.938	13.447
	A exterior	14.354	14.354
	β <sub>2</sub>	0.901 <	0.936

El objetivo de estos experimentos fue determinar la eficacia del PCM forzando las condiciones de temperatura exterior con un SW de control, para acotar así mejor los parámetros bajo los que se realizaba el experimento. Una de las incógnitas a resolver para diseñar el SW que generaría los ciclos de calentamiento forzados era conocer el tiempo que el PCM tardaba en fundir/solidificar bajo las condiciones ambientales aplicables a nuestros experimentos. Este dato no fue suministrado por el proveedor, ya que es un parámetro que depende de las condiciones concretas de cada experimento (entre otros, transmisión de calor mediante convección, conducción, etc.). De los resultados del experimento previo A y B, dedujimos que el ciclo ideal de carga y descarga de este PCM debía ser de 6 horas en total. Decidimos no incluir aislante poliestireno para poder apreciar mejor el efecto del PCM (tras las conclusiones obtenidas en el experimento 2). Otra incógnita fue

seleccionar la potencia de la lámpara halógena, suficiente para las dimensiones de nuestra maqueta y que fuera capaz de elevar la temperatura del recinto exterior por encima de la de fusión del PCM (margen de seguridad). Por último debíamos evitar un descenso brusco de la  $T^a$  del recinto interior, por lo que la lámpara también debía encenderse cada cierto tiempo en el ciclo de enfriamiento. Se puede apreciar en las figuras 10 y 11, que se parametrizó con el SW una función lineal que nos indicaba en cada momento la  $T^a$  deseada a alcanzar en el cubo exterior de la maqueta (curva negra) y después se tomaron las medidas reales de  $T^a$  exterior (curva verde), prácticamente coincidentes con las de la curva de  $T^a$  deseada, lo que confirma el correcto funcionamiento de nuestro SW de control y el control óptimo del ciclo de  $T^a$ .

Para analizar los resultados de manera cuantitativa, se decidió aplicar otro método matemático: en este caso, se compararon los coeficientes  $\beta$  obtenidos dividiendo las áreas bajo las curvas de temperatura exterior e interior (en función del tiempo) y se mostraron los resultados en la tabla 5. El valor del coeficiente es menor usando PCM, lo que supone que la  $T^a$  interior se mantuvo más homogénea, dentro de un rango de variación menor durante toda la experimentación, mientras que el rango de variación de la  $T$  forzada exterior fue notable. Vemos que, aun usando otro método numérico, se corrobora igualmente la efectividad del PCM como material termorregulador y que contribuye a elevar la inercia térmica del cerramiento.

## **6. CONCLUSIONES**

De los resultados obtenidos en los experimentos realizados se puede concluir que:

- El PCM instalado es eficaz como termorregulador, reduciendo las oscilaciones térmicas en ambientes interiores (incremento de inercia térmica en edificaciones) y aumentando la eficiencia energética, siendo su efecto aún más notorio en sin aislante que con él (PS expandido), e incrementando la capacidad de almacenamiento de energía térmica de cerramientos realizados con placa de yeso laminado.

- Confirmamos el rango de temperaturas en las que se producen la solidificación y la fusión del PCM mientras el tiempo necesario para el cambio de fase se reduce cuando la oscilación térmica en el exterior aumenta.
- El uso del PCM reduce las necesidades de utilización de sistemas de climatización activa para mantener la temperatura del interior en el rango de confort humano.
- En cuanto al aprendizaje adquirido en este proyecto, los procesos involucrados en la puesta a puntos y análisis de los experimentos han permitido establecer una base teórica y numérica que permitiría analizar la aplicación de PCMs en un experimento de mayor envergadura (dimensiones del habitáculo más realistas, disposición de una cantidad de material PCM que permita una mejor distribución de éste a lo largo de los diferentes muros del habitáculo o bien jugar con otros PCMs y condiciones ambientales) y estudiar las variaciones producidas, es decir, este proyecto podría ser utilizado en posteriores estudios de ampliación por parte de otros alumnos o expertos en la materia para encadenar nuevas líneas de investigación.

**Para más información, se adjunta vídeo recogiendo la presentación del presente proyecto (copiar enlace a internet para visualizarlo):**

<https://drive.google.com/open?id=1a8mhdm-nxjcQ8MpNfAruxYd27f79NfpJ>

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. María, M. Quemada, E. San, and M. González, “El futuro de los combustibles fósiles.”
- [2] “Estado del arte de sistemas de almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase, a media y alta temperatura.”
- [3] A. Pasupathy, R. Velraj, and R. V. Seeniraj, “Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 1, pp. 39–64, Jan. 2008.
- [4] “Typical temperature stabilization span. [http://climator.com/wp-content/pdf/Prodblاد\\_Climsel\\_-C18\\_4.1.pdf](http://climator.com/wp-content/pdf/Prodblاد_Climsel_-C18_4.1.pdf).”
- [5] “DHT22: Sensor de humedad/temperatura de precisión para Arduino | Panama Hitek. [Online]. Available: <http://panamahitek.com/dht22-sensor-de-humedadtemperatura-de-precision-para-arduino/>. [Accessed: 17-Jan-2018].
- [6] C. I. Plc, *Croda Phase Change Materials :: Products - Products*. <http://www.crodatherm.com/home.aspx?d=content&s=185&r=1157>. .
- [7] “Arduino y los Relés | Tienda y Tutoriales Arduino.” [Online]. Available: <https://www.prometec.net/reles/>. [Accessed: 28-Aug-2017].