

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS “CARLOS RAFAEL RODRÍGUEZ”
FACULTAD DE INGENIERÍA



**Trabajo de Diploma en opción al título de: Ingeniero
Mecánico**

**Título: Incremento de Eficiencia Energética de Sistemas de
Climatización utilizando free-cooling con PCM.**

Autor: Cynthia Leonor Castro Santana

Tutores: DrC. Juan B. Cogollos Martínez

Ing. Luis Daniel Valle Díaz

2023

“Año 65 de la Revolución”

PENSAMIENTO

Si no tenemos estrechez de miras, podemos descubrir que la diversificación de una producción más innovativa y con menor impacto ambiental puede ser muy rentable. Se trata de abrir camino a oportunidades diferentes, que no implican detener la creatividad humana y su sueño de progreso, sino orientar esa energía con cauces nuevos.

Papa Francisco, Laudato si

AGRADECIMIENTOS

Agradecer primero que todo a mis tutores.

A mis compañeros de aula por estos sacrificados años de lucha continua en cada ordinario, extraordinario y mundial; por cargar con este mal necesario como yo les digo.

A mi familia y todas las personas que de una forma u otra han estado al pendiente todos estos años de mi evolución profesional.

A todos los profesores que formaron parte de nuestra preparación desde el primer día.

A mi esposo por las innumerables noches de desvelo que pasamos para ayudarnos mutuamente a estudiar y hacer trabajos de carreras totalmente diferentes.

DEDICATORIA

A mi familia que nunca ha dejado de alentarme para culminar este trabajo.

ACRÓNIMOS

Siglas	Significado
PCM	Materiales de cambio de fase (Phase change materials, por sus siglas en ingles)
TES	Almacenamiento de energía térmica (Thermal Energy Storage, por sus siglas en ingles)
TESS	Sistema de almacenamiento de energía térmica (System thermal Energy Storage, por sus siglas en ingles)
TCF	Temperatura de cambio de fase
EFCS	Sistema gratuito mejorado (enhanced free cooling system)
CO ₂	Dióxido de Carbono
UTA	Unidad de tratamiento de aire
Ucf	Universidad de Cienfuegos

Contenido

INTRODUCCION.....	1
CAPÍTULO 1: Estado del arte del uso de los materiales de cambio de fase en sistemas de free cooling para edificios.....	4
1.1 Introducción	4
1.2 Introducción a los materiales de cambio de fase	4
1.3 Propiedades de los materiales de cambio de fase	6
1.3.1 Ventajas y desventajas de los principales tipos de PCM:	7
1.3.2 Clasificación de las aplicaciones de los PCM.....	9
1.4 ¿Qué es el free cooling?.....	10
1.5 Fundamentos del free cooling	12
1.5.1 Tipos de free cooling.	12
1.5.2 Las ventajas e inconvenientes que presenta el sistema free cooling en climatización.....	13
1.6 Estudio de PCM en sistemas free cooling.	14
1.7 Aplicaciones del sistema de refrigeración natural free cooling.	15
1.8 Eficiencia energética en edificios y en los sistemas de climatización.	16
1.8.1 ¿Cómo mejorar la eficiencia energética de un edificio?	17
CONCLUSIONES PARCIALES.....	19
CAPÍTULO 2: Cálculo de cargas térmicas.....	20
2.1 Introducción	20
2.2 Centro de gestión del conocimiento y la innovación (CGCI). Ucf.	21
2.2.1 Características del inmueble	21
2.2.2 Disposición de locales.....	21
2.3 Metodología para el cálculo de las cargas térmicas.	23
2.3.1 Cargas térmicas sensibles	23
2.3.2 Cálculo de la carga térmica latente.	29
2.4 Cargas térmicas de los locales.....	30
CONCLUSIONES PARCIALES.....	33
Capítulo 3. Free-cooling con materiales de cambio de fase para edificio.....	34
3.1 Introducción.	34
3.2 Almacenamiento de energía en PCM.	35
3.3 Estudio de la temperatura en la ciudad de Cienfuegos.	37

3.4 Selección del PCM.	39
3.5 Selección de los ventiladores para el Free-cooling.	39
3.6 Consumo de energía del sistema Free cooling+PCM+Climatización.	39
CONCLUSIONES PARCIALES	43
CONCLUSIONES	44
RECOMENDACIONES	45
BIBLIOGRAFÍA.....	46
ANEXOS.....	48

RESUMEN

El estudio de tecnologías que garanticen el ahorro de la energía generada a partir del uso de los combustibles fósiles, es imprescindible tanto por los costos económicos como medioambientales. Dentro de ellos, la reducción del consumo energético en las edificaciones, por la dependencia de fuentes primarias y energía eléctrica en la explotación de sus actividades, pudiera aportar avances en ese reto, pues ellas representan el 50% de ese consumo. En este trabajo se realiza un análisis de las posibilidades de utilización de los materiales de cambio de fase en el almacenamiento de energía térmica para mejorar la eficiencia energética de los sistemas de climatización de las edificaciones. Tema poco estudiado en las condiciones de nuestro País. Se estudia la variación de la temperatura en la ciudad de Cienfuegos, concluyéndose que es factible el uso de los PCM pues en la madrugada, esta es inferior a la temperatura de cambio de estado durante una gran parte del año. A partir de la revisión bibliográfica y de los balances de energía, se selecciona un sistema Free-cooling activo con 20 kg de PCM RT26, que tiene un costo de €378,18, para veinte locales del futuro Centro de Gestión del Conocimiento y la Innovación en la Universidad de Cienfuegos. Aunque el objetivo fundamental de la instalación de esta tecnología será su evaluación y ajuste a las condiciones climáticas de Cuba, su uso en el centro, traería un ahorro mínimo de energía de 0.18 MWh en el mes.

Palabras clave: Materiales de cambio de fase, Acumulación de frío, Depósito de PCM, Demanda eléctrica, Ahorro económico, Eficiencia energética, Free- cooling.

ABSTRACT

The study of technologies that ensure energy savings generated from the use of fossil fuels is essential, both for economic and environmental costs. Among them, the reduction of energy consumption in buildings, due to the dependence on primary sources and electricity in the exploitation of their activities, could contribute advances in this challenge, as they represent 50% of that consumption. This work carries out an analysis of the possibilities of using phase change materials in thermal energy storage to improve the energy efficiency of building air conditioning systems. This is a topic that has been little studied under the conditions of our country. The variation of temperature in the city of Cienfuegos is studied, concluding that the use of PCM is feasible since in the early morning, it is lower than the state change temperature for a large part of the year. Based on the literature review and energy balances, an active Free-cooling system with 20 kg of PCM RT26 is selected, which has a cost of €378.18, for twenty premises of the future Knowledge and Innovation Management Center at the University of Cienfuegos. Although the fundamental objective of the installation of this technology will be its evaluation and adjustment to the climatic conditions of Cuba, its use in the center would bring a minimum energy saving of 0.18 MWh per month.

Key words: Phase change materials, Cold accumulation, PCM deposit, Electrical demand, Economic savings, Energy efficiency, Free-cooling

INTRODUCCION

El alza de los precios del petróleo, el cambio climático y la crisis energética en los últimos tiempos obliga a aumentar la eficiencia energética en todos los campos y sobre todo, en los más consumidores de energía e indirectamente más contaminantes. Debido a crecimiento de las zonas urbanas y el aumento de los parámetros de confort, en el año 2021, se estima que el 50% de la energía utilizada mundialmente, se consume en edificios comerciales y residenciales. Los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) constituyen aproximadamente el 35 % de la energía consumida en estas edificaciones (World Energy Agency, 2022). Por tanto, es importante que la eficiencia energética de los equipos de climatización sea lo más alta posible, para conseguir un ahorro energético significativo. por lo que se considera conveniente realizar un estudio de cómo puede mejorarse su eficiencia energética, habitabilidad e instalaciones técnicas, donde se apliquen soluciones bioclimáticas apoyadas de fuentes de energías renovables.

Dentro de las diferentes alternativas de métodos de climatización se encuentran:

- La ventilación natural: En la ventilación natural, el movimiento del aire resulta de la diferencia de temperatura y presión entre el ambiente interior y exterior; es decir que la introducción de aire exterior en un edificio impulsado por diferenciales de presión de producción natural.
- Enfriamiento evaporativo: Consiste en enfriar el edificio absorbiendo aire a una temperatura determinada desde el exterior, y reducirla debido a la absorción de energía (calor sensible) para evaporar una corriente de agua inducida, de manera que se proporciona aire más frío y húmedo.
- Materiales de cambio de fase (PCM) por sus siglas en inglés: Es una tecnología en crecimiento que consiste en microcápsulas hechas de una combinación de parafina, cera u otros materiales de punto de fusión bajo, que tienen el objetivo principal de almacenar el calor para actuar como sistemas de enfriamiento gratuito. Su principio básico es el cambio de fase del material de construcción, principalmente de sólido a sólido, de sólido a líquido y de líquido a gas y de este modo almacenar calor latente en el cambio de fase y luego liberarlo. Como el tipo de calor almacenado es principalmente latente, la variación de temperatura del material permanece casi invariable. La temperatura de fusión del material debe ser lo más cercana posible al

rango de confort de temperatura interior, generalmente establecido entre 20°C y 26°C. Además, los diferentes estudios se centran en la mejora de la conductividad del PCM, que es baja, con el fin de almacenar tanto el calor latente como el sensible.

Después de haber expuesto todos estos métodos de climatización hemos llegado a la conclusión de hacer un diseño con materiales de cambio de fase en la climatización del Centro de Gestión del Conocimiento y la Innovación para así obtener una concepción de edificio inteligente que no es posible sino se tiene en cuenta su eficiencia energética.

Problema científico

No se encuentra, en la literatura revisada, evidencias del uso del sistema free-cooling con PCM para el incremento de la Eficiencia Energética de sistemas de climatización de edificaciones en Cuba.

Hipótesis

El uso de materiales de cambio de fase en sistema de climatización con apoyo de free-cooling, posibilita el incremento de la eficiencia energética de los edificios en Cuba.

Objetivos generales

Selección de sistema de free-cooling con PCM para incremento de la eficiencia energética de edificios.

Objetivos Específicos

1. Estudiar el uso de PCM para el incremento de la eficiencia energética de edificio.
2. Determinar la carga térmica a climatizar en el Centro de Gestión del Conocimiento y la Innovación.
3. Seleccionar un sistema free-cooling activo con PCM para incremento de eficiencia energética de edificio para Centro de Gestión del Conocimiento y la Innovación.

CAPÍTULO 1: Estado del arte del uso de los materiales de cambio de fase en sistemas de free cooling para edificios.

1.1 Introducción

El desarrollo del mundo de la refrigeración avanza conforme lo hacen las demás tecnologías. Anteriormente se utilizaban equipos de confort para refrigerar pero estos resultaban altamente ineficiente ya que dichos equipos logran enfriar a un coste muy elevado. A continuación se realizará una revisión de las principales aplicaciones de los materiales de cambio de fase haciendo especial hincapié en aquellos relacionados con sistemas de climatización.

Se presentarán los materiales de cambio de fase y se definirán las principales propiedades deseables en su uso para almacenamiento térmico. Se describirán los distintos tipos de materiales de cambio de fase existentes y las principales ventajas y desventajas que presentan cada una de ellos.

1.2 Introducción a los materiales de cambio de fase

Dentro de las tecnologías efectivas para disminuir la contaminación ambiental y promover la sostenibilidad del desarrollo industrial está la utilización de energías renovables (por ejemplo, energía solar, energía geotérmica, energía de biomasa y energía de las mareas) lo cual ha experimentado un notable desarrollo en los últimos años. La energía térmica es una de las formas de energía más abundante y se considera fundamental para muchas aplicaciones industriales y domésticas que constituyen un 60–70% del consumo actual de energía en el mundo. Sin embargo, el desperdicio y suministro discontinuo de energía térmica utilizando estas fuentes, generalmente resultan en una baja eficiencia de su uso y provoca un conflicto entre oferta y demanda. (Lund & Boyd, 2016)

El almacenamiento de energía térmica es un método de acumulación de energía que aprovecha el calor, incrementando o disminuyendo la temperatura de una sustancia, cambiando la fase de la sustancia o una combinación de ambos mecanismos. (Dincer & Rosen, 2013). Los sistemas de almacenamiento de energía térmica (Thermal Energy Storage TES) se utilizan además, como una vía de garantizar en la industria u otras aplicaciones, el desacoplamiento de la fuente de calor (que suele ser intermitente) de su suministro, consiguiendo un aprovechamiento de la energía bajo

demanda, y permitiendo reutilizarla regulando factores como la temperatura y/o la potencia.

Santosh y otros autores, ha realizado una amplia revisión de las publicaciones que sobre la aplicación de las TES se han realizado entre los años 2009 al 2022. En el estudio, se demuestra que la energía térmica almacenada puede ser utilizada para aplicaciones de calefacción y refrigeración, posibilitando además nuevas alternativas hacia el desarrollo sostenible. (Santosh, Rudrapati, & Manickam, 2022). La figura 1 muestra algunos ejemplos de la aplicación de estas tecnologías.

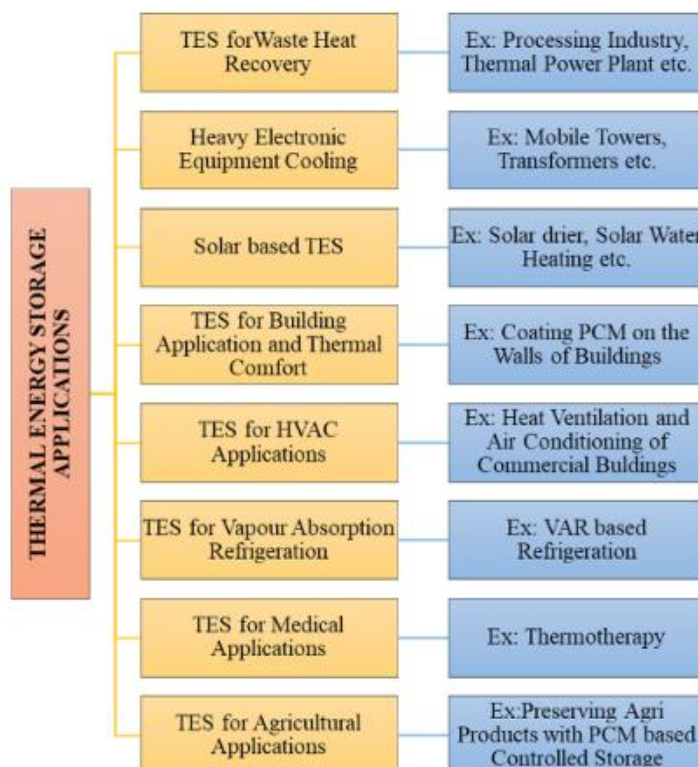


Figura 1: Aplicaciones de tecnologías de almacenamiento de energía térmica. (Santosh, Rudrapati, & Manickam, 2022)

La figura 2 muestra los tipos de TES. Entre estas tecnologías, existe el almacenamiento de calor basado en el cambio de fase de algunos (phase-change materials (PCM), que ha sido ampliamente estudiado en virtud de su sencillez operativa y alta densidad de almacenamiento de energía a una temperatura casi constante.



Fig. 2 Clasificación de los tipos de almacenamiento térmico.

1.3 Propiedades de los materiales de cambio de fase

Los PCM son materiales de almacenamiento térmico mediante calor latente. La energía se obtiene del cambio de fase entre sólido y líquido del material. Las principales propiedades deseables de un PCM son:

Propiedades térmicas

- Temperatura de cambio de fase.
- Elevado calor sensible y latente.
- Elevada conductividad térmica.

Propiedades físicas

- Baja presión de vapor (menor de 1 bar).
- Elevada densidad y baja variación de volumen.
- Elevada estabilidad de fase.

Propiedades cinéticas

- Elevado ratio de cristalización.
- Elevada nucleación para evitar subenfriamiento.

Propiedades químicas

- Compatible con el material del contenedor.
- Elevada estabilidad química frente a los ciclos del funcionamiento.

- No inflamable, no tóxico y no explosivo.

Propiedades económicas

- Económico y abundante.

1.3.1 Ventajas y desventajas de los principales tipos de PCM:

Por su parte, el almacenamiento térmico mediante calor latente presenta dos ventajas importantes frente al almacenamiento por calor sensible:

- Una mayor densidad que permite que se puede almacenar la misma energía en una menor cantidad de material.
- Un menor rango de temperaturas para almacenar igual cantidad de energía.

El almacenamiento térmico mediante energía utiliza procesos reversibles. La energía almacenada depende de la energía de reacción del proceso. Este tipo de almacenamiento es, por lo general, más complejo que los dos anteriores y por lo tanto de más difícil aplicación.

Parafinas

Ventajas

- Químicamente estable, no tóxico, fiable y no corrosivo.
- Sin tendencia al subenfriamiento o segregación.
- Buen calor latente de fusión.
- Compatible con contenedores de metal.
- Económico y disponible.

Desventajas

- Baja densidad y conductividad térmica.
- Incompatible con contenedores de plástico.
- Elevado cambio de volumen, volátil e inflamable.
- Sin punto de fusión definido y preciso.

Ácidos grasos

Ventajas

- Elevado calor latente de fusión.
- Cambio de fase preciso.
- Muestran procesos de fusión y congelación reproducibles.
- Sin subenfriamiento.

Desventajas

- Baja conductividad térmica.
- Bajo punto de inflamabilidad.
- Inestable a altas temperaturas.
- Tóxico y levemente corrosivo.
- De 2 a 3 veces más caros que las parafinas.

Sales hidratadas

Ventajas

- Elevado calor latente de fusión por unidad de volumen.
- Elevada conductividad térmica.
- Menor cambio de volumen que el resto.
- Mayor densidad.
- Punto de fusión preciso.
- Barato y disponible.

Desventajas

- Corrosión en contenedores de metal.
- Segregación de fase.
- Subenfriamiento.
- Falta de estabilidad térmica.
- Ligeramente tóxico.

Metales

Ventajas

- Elevada conductividad térmica.
- Baja presión de vapor.
- Elevado calor de fusión por unidad de volumen.

Desventajas

- Bajo calor específico.
- Bajo calor de fusión por unidad de peso.
- Caros.

Eutécticos

Ventajas

- Buena conductividad térmica.
- Elevado calor latente de fusión por unidad de volumen.

Desventajas

- Bajo calor latente de fusión por unidad de peso.
- Muy caros.

1.3.2 Clasificación de las aplicaciones de los PCM

Debido a las múltiples aplicaciones documentadas, las fronteras entre estos grupos pueden llegar a ser, en algunos casos difusas. En esta clasificación se distingue entre activas y pasivas, siendo las aplicaciones pasivas de los PCM las que persiguen, en la mayoría de los casos, el incremento de una inercia térmica de la zona a climatizar; y las activas en las que existe movimiento forzado de algún fluido para que se produzca el intercambio térmico. Esto hace que, por ejemplo, se considere su uso para free-cooling (ventilación mecánica controlada) como una aplicación activa a pesar de que algunos autores la consideran pasiva, ya que no se produce una generación artificial de frío/calor, si no que se utiliza la temperatura del aire exterior para climatizar la vivienda. (Real, 2017)

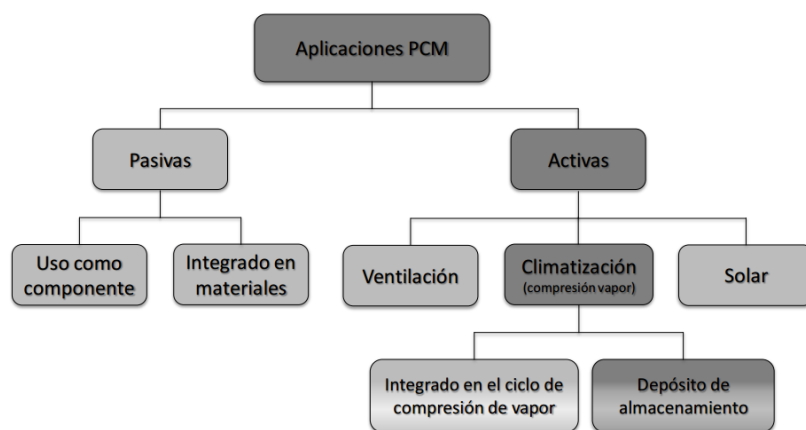


Fig. 3 Aplicaciones de los PCM.

Para almacenar y extraer la energía al utilizar estos materiales, en el momento que resulte más beneficioso económica o desde el punto de vista energético, se utilizan diferentes estrategias. Una de ellas es utilizarlas para la ventilación mecánica controlada (free-cooling).

1.4 ¿Qué es el free cooling?

El Free-Cooling es la técnica por la cual se permite el ingreso de aire exterior dentro de un edificio por medios mecánicos y controlados. Es una ventilación mecánica controlada que aprovecha muchas ventajas de la ventilación natural permitiendo un ahorro considerable en cuanto a consumo energético del sistema de climatización. Es un método que consiste en el aprovechamiento del aire a baja temperatura, generalmente por la noche. En el caso particular de su uso con PCM, este aire a baja temperatura es utilizado con el fin de enfriar un depósito de almacenamiento térmico para su posterior uso enfriando el aire del local. Para aplicar esta tecnología se deben dar ciertas condiciones. Autores como (Zalba, 2004), (Butala & Stritih, 2009) y más reciente (Zeinelabdein, Omer, & Mohamed, 2020) coincidieron en señalar que el potencial energético de este tipo de esquema dependen de las condiciones micro climáticas (una de esas condiciones es la diferencia de temperaturas entre el día y la noche, condicionada por el clima de la localidad). Un ejemplo de un sistema TESS (Thermal Energy Storage System) con macro cápsulas de PCM se muestra en la figura 4:

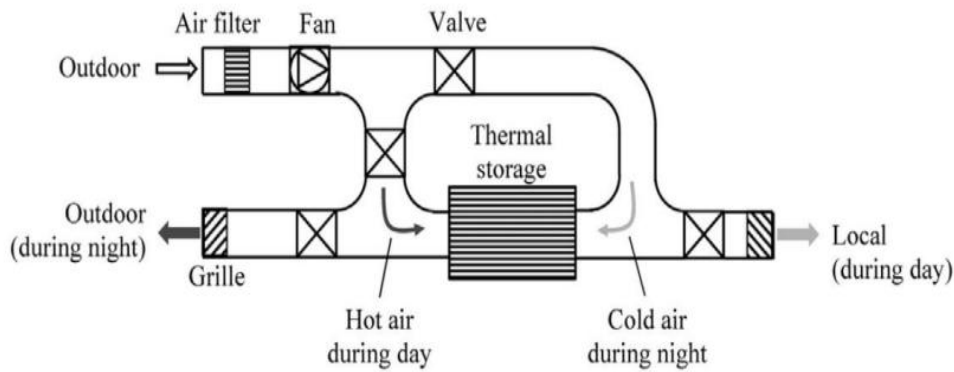


Fig. 4 Esquema de funcionamiento de un sistema de free-cooling con acumulación térmica mediante PCM. (Real, 2017)

La función del PCM en el sistema de ventilación es controlar la temperatura del aire de entrada para alcanzar una temperatura interior cercana a las que garantizan los estándares de confort. Para realizar estos intercambios térmicos, se utilizan ventiladores. Es por eso que se define este tipo de sistema como free cooling activo.

La selección del PCM apropiado requiere conocimiento y experiencia en la temperatura de cambio de fase sólido a líquido (TCF) y en la aplicación específica. Para alcanzar las condiciones de confort en edificaciones, se utilizan PCM con la TCF entre 18 y 30 °C. La temperatura exterior define el otro requisito fundamental que es la temperatura de solidificación del PCM.

Varios autores han utilizado diversos métodos numéricos para simular el comportamiento del PCM en el sistema de free cooling, empleando para ello estudios teóricos y experimentales. Los métodos numéricos más usados son el método de las entalpías y el método del calor específico efectivo. Ambos métodos tienen como beneficio que son modelos tipo caja blanca y representan las ecuaciones de transferencia de calor que gobiernan las sustancias. El método de las entalpías posee como dificultad principal, que sólo pueden emplearse cuando el PCM está compuesto por sustancias puras, mientras que de forma general los PCM comerciales están compuestos por mezclas.

En el caso de las mezclas es necesario determinar el rango de temperatura de transición. En ese caso la transición de cambio de fase puede simularse a través del método del calor específico efectivo. En ambos se obtienen resultados precisos cuando se correlacionan con datos experimentales. No obstante, el empleo de

modelos tipo caja negra, utilizando herramientas de inteligencia artificial, permitirá reducir el tiempo de análisis de estos sistemas y así mismo un campo de investigación efectivo. Las simulaciones de los procesos de cambio de fase, implican entre otros problemas el de no linealidad, esa es la razón por la que sólo para las configuraciones más simples se pueden utilizar herramientas analíticas, mientras que para resolver la mayoría de los problemas de interés se requiere el uso de métodos numéricos.

La retroalimentación de un modelo teórico con los resultados experimentales permitirá profundizar en aspectos dirigidos a la mejora y adaptación del modelo para su final validación y establecer entre otros la viabilidad térmica del equipo.

1.5 Fundamentos del free cooling

El free cooling trata de aprovechar el bajo contenido de entalpía del aire exterior para la refrigeración de un espacio determinado. El sistema completo se compone de cinco elementos fundamentales:

- Equipos de aire acondicionado de precisión con un ventilador radial necesario para la aspiración de aire del exterior para impulsarlo en la sala.
- Ventiladores para la extracción de aire caliente de sobrepresión de la sala.
- Compuertas motorizadas para la función de retorno de aire a los equipos.
- Filtración de aire procedente del exterior.
- Sistema de control de humedad y temperatura.

1.5.1 Tipos de free cooling.

Dentro del mundo de la refrigeración existen dos tipos de free cooling: directo e indirecto.

El free cooling directo se basa en la aspiración del aire exterior e introducirlo directamente en el espacio a refrigerar. Para ello es necesario acondicionarlo mediante la filtración de partículas sólidas, tratamiento antibacteriano o dilución de agentes químicos dependiendo de los requerimientos del proyecto. Finalmente, un tratamiento para regular la humedad que contiene el aire para poder ser aplicado como fuente de refrigeración en un ambiente crítico, en el caso de un centro de procesamiento de datos el tratamiento a realizar será la de filtración de partículas sólidas y tratamiento del nivel de humedad. Por otro lado, está el free cooling indirecto

el cual se caracteriza por el empleo de agua fría para realizar el intercambio de calor. Este modelo de free cooling utiliza una unidad de tratamiento de aire (UTA) que recibe el agua y la enfría mediante una enfriadora ubicada en la cubierta, cuenta con una serie de elementos muy parecidos a los que pueda tener una unidad evaporadora de free cooling directo, es decir, dos compresores, filtros de aire, ventiladores y un serpentín por el que circula el agua.

Durante el funcionamiento del sistema de free cooling se pueden dar las siguientes situaciones:

- La temperatura exterior es menor que la temperatura del aire de impulsión. En este caso se hará uso de las compuertas y los ventiladores para introducir el aire desde el exterior y mezclarlo con el aire recirculado obteniendo de esta forma la temperatura deseada. $T_e < T_i$
- La temperatura exterior es mayor que la de impulsión, pero menor que la del aire recirculado. Ante esta situación las enfriadoras han de rebajar la temperatura del aire exterior hasta igualar la temperatura de impulsión.
- La temperatura del exterior es mayor que la temperatura de retorno. Este caso se suele dar en los meses de la época estival con lo cual la sala se ha de refrigerar empleando el sistema de aire acondicionado convencional.

1.5.2 Las ventajas e inconvenientes que presenta el sistema free cooling en climatización.

• Ventajas:

- Es posible realizar una ventilación efectiva de toda la sala junto con free cooling.
- Como todo sistema de refrigeración, realiza una distribución homogénea de aire frío en la sala.
- Con el objetivo de reducir las cargas térmicas de forma rápida y efectiva, es posible programar ventilación-refrigeración nocturna.
- La eficiencia energética que logra el free cooling supera cualquier sistema de climatización.

• Desventajas:

- Requiere de ventiladores, compuertas motorizadas, filtros y un sistema de conductos de distribución completamente estancos para que la eficiencia del sistema en conjunto sea de máximo nivel.
- Requiere un mínimo consumo de energía, no es totalmente gratuito.
- El éxito de este método depende en gran parte por su sistema de control utilizado para gestionar la entrada y mezcla del aire exterior.

El free cooling aborda casi por completo la reducción de costes ya que se basa en una refrigeración de forma “gratuita” aprovechando las bajas temperaturas del exterior para introducirla en la sala y así evitar el gran consumo que genera el condensador de estos equipos y pasarían a funcionar en el modo de solo ventilación en vez de aire refrigerado. (Jímenez, 2022)

1.6 Estudio de PCM en sistemas free cooling.

El estudio de PCM en países con clima tropical es de gran importancia ya que las características del clima modifican las posibilidades de este sistema. Por ejemplo (Jiao & Xu, 2015) reconocen que las regiones que poseen una diferencia de temperatura de 12-15 °C entre el día y la noche se ha comprobado que se puede aplicar con buenos resultados este tipo de tecnología. (Solgi, 2019) condujo un análisis paramétrico del estudio de un sistema de almacenamiento con PCM acoplado al free-cooling en tres regiones climáticas de Australia. El mismo concluyó que para el caso correspondiente al clima tropical, el funcionamiento del sistema no era efectivo con una reducción del 9-12 % de la carga térmica, respecto al resto de los climas analizados que alcanzaron el rango del 14-23 % (clima desértico) y 51-66 % (clima sub tropical). En este estudio se utilizaron tres tipos de PCM (PCM 25, 26, 27); en el caso del clima tropical, con el PCM 26 se obtuvo el mejor comportamiento (10-15 %).

(Panchabikesan, Mastani, & Haghighat, 2020), analizaron el funcionamiento de un sistema convencional TES con PCM y free-cooling y otro sistema conocido como sistema gratuito mejorado (enhanced free cooling system EFCS), que no es más que emplear un flujo de aire o agua helada (desde un equipo de compresión de vapor) para contribuir al proceso de solidificación de PCM. Los resultados arrojaron, primeramente, que, si la diferencia de temperatura entre el aire y la temperatura de solidificación PCM es menor de 3 °C, no es recomendable aplicar ningún tipo de los dos sistemas propuestos. Estos autores recomiendan no usar un PCM menor de 27

°C para este clima. No obstante, refiere que se puede variar dicho potencial con el flujo del aire de reactivación del PCM y la superficie de intercambio. Finalmente, el tiempo de solidificación del PCM fue un 29 % menor en los sistemas EFCS que en los convencionales. Reafirmando lo anterior expuesto (Muthuvelan, 2018), especifica que un requisito importante a tener en cuenta es que la temperatura de descarga de PCM debe ser como límite 5 °C superior a la temperatura de confort. De lo contrario el sistema no cumple su objetivo. No obstante, existen parámetros operacionales que mediante su modificación y optimización, pudieran extender los rangos de eficiencia de estos sistemas. (Prabhakar, Saffari, Gracia, & Cabeza, 2020) Demostraron, que empleando la ventilación nocturna controlada mejora la eficiencia de los paneles de PCM, se puede incrementar la eficiencia de estos entre en un amplio rango (3.32% a 25.62%).

(Zeinelabdein, Omer, & Mohamed, 2020) Efectuaron un estudio paramétrico de un sistema relleno con RT28HC PCM en una región caracterizada por clima tropical. Se analizaron diversas configuraciones geométricas de las macro cápsulas de PCM y parámetros operacionales del TES. Su estudio demostró que a cierta diferencia de temperatura entre la temperatura del aire y la TCF del PCM, el flujo de aire contribuye significativamente en su eficiencia. Mientras mayor sea el flujo de aire, más rápido es el proceso de solidificación. Así mismo, para un flujo de aire óptimo, el incremento de la temperatura exterior, disminuye el tiempo de licuefacción del PCM y por consecuencia, el tiempo de confort térmico.

El clima va transitando hacia condiciones más cálidas, con temperaturas asociadas a más calor y menos días fríos, producto de temperaturas máximas y mínimas más elevadas en casi todas las regiones y similar comportamiento en los eventos extremos asociados a estas. Como consecuencia de este comportamiento climático, será necesario encontrar formulaciones de PCM que logren solidificarse a las temperaturas nocturnas y tecnologías que garanticen alta eficiencia del proceso de ventilación.

1.7 Aplicaciones del sistema de refrigeración natural free cooling.

Aunque pueda parecer más lógico que durante la época de invierno lo que demanda un edificio sea calefacción y no aire frío, sí existen locales o inmuebles que por sus características o actividad necesitan refrigeración todo el año. En este sentido, el free

cooling entra en funcionamiento y se abren unas compuertas que permiten la entrada del aire exterior y una vez filtrado se impulsa hacia dentro del local.

Es el caso de locales comerciales, cines, teatros, auditorios, salas de fiesta, centros de procesamiento de datos, comercios con gran uso de neveras y congeladores, etc., espacios en los que la temperatura sube fácilmente, por lo que el aire de fuera suele estar siempre a una temperatura inferior, incluso en periodos estivales. Por lo tanto, en este tipo de lugares es una solución factible para grandes periodos del año, lo que supone una reducción energética y en la factura final muy importante. (cottes trust beyond innovation, 2020)

1.8 Eficiencia energética en edificios y en los sistemas de climatización.

La geotermia, la energía eólica o solar son algunas de las fuentes de energía utilizadas para alcanzar el objetivo de contar con un edificio energéticamente eficiente. Del mismo modo, es necesario garantizar una utilización racional de esas energías para abastecer las necesidades energéticas de la climatización de un inmueble (calefacción y refrigeración), generación de agua caliente sanitaria o de piscinas, iluminación a través de sistemas eficientes, que consumen poco y al mismo tiempo garantizan un alto grado de confort en la vivienda, así como una correcta orientación de los edificios. Es decir el alto grado de eficiencia energética de un edificio también se consigue a través de la reducción de pérdidas energéticas gracias a soluciones como el aislamiento térmico de las superficies o la utilización de cerramientos que garanticen una correcta hermeticidad y estanqueidad, sin comprometer la ventilación. (Rehau, s.f.)

En resumen, la eficiencia energética en los edificios es el conjunto de las soluciones empleadas tanto en edificios nuevos como antiguos con el objetivo de conseguir viviendas de consumo de energía casi nulo. (Rehau, s.f.) Esto implica construir o mejorar los edificios que pueden aprovechar al máximo la energía que se les suministra al tomar medidas para reducir la pérdida de energía, como disminuir la pérdida de calor a través de la envoltura del edificio. Por suerte cada vez existe una mayor conciencia y más normativas sobre la eficiencia energética y el consumo de energía a nivel doméstico, cuyo objetivo es reducir la contaminación ambiental.

Todo esto es posible también mediante un buen sistema de climatización que la clasificación de estos sistemas que se dispone en el mercado va más allá de lo que muchos ciudadanos piensan. La industria ha avanzado a grandes pasos en este sentido y hoy podemos hablar de los sistemas aire/aire (instalaciones todo aire conocidas como 'split'), los sistemas aire/agua (representados principalmente por la aerotermia), los sistemas agua/agua (instalaciones todo agua representadas por la geotermia) y los sistemas agua/aire. Cualquier sistema de climatización suministra bien aire acondicionado y aire acondicionado como calefacción, ya que regula las condiciones ambientales en la estancia que queremos, controlando la calidad, temperatura y humedad del aire. (BBVA, s.f.)

1.8.1 ¿Cómo mejorar la eficiencia energética de un edificio?

Para mejorar la eficiencia energética de un edificio, se debería realizar una rehabilitación energética integral. Conviene aprovechar las obras y mejoras que se vayan a realizar en el edificio, reparaciones, etc. para incluir este tipo de medidas de eficiencia energética que nos permitan ahorrar energía en los edificios. Las mejoras en el aislamiento, por ejemplo, pueden suponer para una comunidad de vecinos hasta un ahorro del 50 % de la energía consumida con los sistemas de climatización, por lo que conviene prestar especial atención al aislamiento de fachadas, mejoras en la envolvente térmica, aislamiento en cubiertas, rotura de los puentes térmicos.

Algunas estrategias para mejorar la eficiencia energética de un edificio son:

- La renovación de los sistemas relacionados con la energía: sistemas de calefacción, aire acondicionado, ventilación, iluminación, electrodomésticos. El uso de sistemas eficientes de calefacción, como calderas de condensación o bombas de calor aerotérmicas, que además de ser más eficientes emiten menos emisiones directas de CO₂ a la atmósfera.
- Integración de energías renovables: energía solar térmica, geotermia, aerotermia o sea buscar energías renovables que te permita ahorrar energía y reducir emisiones directas de CO₂.
- Mejora del aislamiento y la estanqueidad y eliminación de puentes térmicos: cambiar las ventanas supone una mejora de la eficiencia energética ya que ayuda a conservar el frío/calor que se genera en la vivienda y aislarla del exterior.

- Integrar energías renovables que permitan ahorrar energía, como paneles solares térmicos o paneles fotovoltaicos para autoconsumo.
- Renovar la iluminación por otra de tipo LED.

Toda reforma en una vivienda debe ir orientada a mejorar la eficiencia energética de un edificio, de cara a reducir la huella ambiental del edificio y reducir el consumo energético. (Rehau, s.f.)

CONCLUSIONES PARCIALES.

1. Se refieren pocos estudios del uso de PCM en climas templados, no obstante, se demuestra en ellos, la posibilidad de su uso combinándolos con otras tecnologías.
2. Para mejorar el ahorro energético de los edificios, se utilizan fundamentalmente PCM micro-en-capsulados en paredes y placas para los pisos y techos.
3. El uso de los materiales de cambio de fase y de las tecnologías de enfriamiento gratis, para incrementar la eficiencia energética de las edificaciones, se estudia profusamente en el mundo, lo cual no ha sido así en Cuba.

CAPÍTULO 2: Cálculo de cargas térmicas.

2.1 Introducción

El conocimiento de las cargas térmicas es imprescindible, como paso previo para acometer la tarea de diseñar el sistema de acondicionamiento del aire interior de un edificio, dependencia o local. Cuando se habla de carga térmica sobre un edificio, se entiende que se habla de un fenómeno que tiende a modificar la temperatura interior del aire o su contenido en humedad. La carga térmica se divide en dos componentes, carga térmica sensible y carga térmica latente. Se define carga térmica sensible como todo fenómeno que tiende a modificar la temperatura interior del local y carga térmica latente como aquella en la que se modifica la cantidad de vapor de agua contenido en el local. Las cargas térmicas de climatización son las siguientes:

- Cargas térmicas sensibles exteriores:

- Cargas térmicas de transmisión a través de paredes, suelos y techos.
- Cargas térmicas de radiación a través de superficies acristaladas.

- Cargas térmicas sensibles interiores:

- Cargas térmicas debidas a los ocupantes.
- Cargas térmicas debidas a la iluminación.
- Cargas térmicas debidas a la ventilación.
- Carga térmica por infiltraciones.
- Carga térmica debida a equipos.

- Cargas térmicas latentes interiores:

- Cargas térmicas debidas a los ocupantes.
- Cargas térmicas debidas a la ventilación.
- Carga térmica por infiltraciones.

La universidad de Cienfuegos se propone un centro gestor de conocimiento y la innovación, aprovechando un edificio de becas existente. Se inscribe el centro como

proyecto de Desarrollo local. La Dirección de la Universidad de Cienfuegos desea convertirlo en un edificio inteligente, bioclimático, con empleo de fuentes renovables y un centro de Big Data, entre otras características funcionales. En su Interior radicarán los laboratorios de los principales especialistas en estas temáticas de la institución y el país, lo que los convierte en actores del proyecto, toda vez que diversos aspectos de domótica, automática, energía y climatización serán configurados por ellos mismos en diversas etapas de la construcción. (IPROYAZ, 2020)

2.2 Centro de gestión del conocimiento y la innovación (CGCI). Ucf.

2.2.1 Características del inmueble

El edificio se encuentra dentro del perímetro de la Universidad de Cienfuegos, cercano a la carretera a Rodas. Esta edificación está construida con el sistema prefabricado "Girón", común en la Cuba de los años 70 y 80 para espacios de uso colectivo. Hoy presenta diversos deterioros, principalmente en terminaciones, redes técnicas y algunas patologías puntuales en losas y vigas, además de diversas modificaciones, muros realizados en bloques y ladrillos, y que se intersecta espacialmente con otros espacios y edificaciones, comprendiendo el futuro Centro Gestor del Conocimiento y la Innovación (CGCI) parte de los mismos, y viceversa. El mismo será transformado acorde a las necesidades y características de Cuba hoy. (IPROYAZ, 2020)

2.2.2 Disposición de locales

Se creará un acceso independiente a la edificación, realizado en hormigón, con control de acceso, parqueo para vehículos varios y acera con rampas para discapacitados. Se crearán áreas de sombra en las zonas exteriores, con especies de plantas autóctonas, de rápido crecimiento y bajo mantenimiento, lo cual contribuye a lo previsto para el sistema Free- Cooling de la especialidad de Climatización y Extracción de Aire.

El edificio mantendrá su estructura principal, realizándose modificaciones principalmente en los cierres, carpintería, redes técnicas y terminaciones. Se repararán y pulirán los pisos actuales de baldosas de terrazo, y se colocará falso techo en interiores de locales, realizando la canalización de varias redes técnicas mediante falsas vigas, falsas columnas y falsos zócalos trasdosados de panelería ligera. La distribución de locales será la siguiente;



Fig. 5: Ubicación del edificio existente

- Recepción
- Espacios Coworking
- Área Reservada
- Laboratorio PMV
- Gerencia / Dirección
- Plataforma Virtual
- Centro de Entendimiento
- Centro de Transferencia
- Servicios Sanitarios Públicos
- Cafetería y Tienda
- Centro de Eventos
- Centro de Control
- Caja de Elevadores



Fig. 6: Piel bioclimática



Fig. 7: Eco-terraza



Fig. 8: Proyección final



a)

b)

Fig. 9: Zonificación volumétrica del edificio. a) Vista Sureste; b) Vista Noreste (IPROYAZ, 2020)

Tabla 1: Distribución de locales y áreas.

	15 m ²	20 m ²	24 m ²	30 m ²	50 m ²	60 m ²
Espacios Coworking				4	2	
TICS Aplicadas				3	1	
Laboratorios PMV			2			
Centro de Entendimiento				1	1	
Centro de eventos	1	1				2
Centro de entendimiento				1	1	
Total	1	1	2	9	5	2

2.3 Metodología para el cálculo de las cargas térmicas.

2.3.1 Cargas térmicas sensibles

Para el cálculo de la carga térmica sensible (Q_s) se emplea la siguiente expresión:

$$Q_s = Q_{sr} + Q_{str} + Q_{si} + Q_{sai} \quad (2.1)$$

Donde,

Q_{sr} es el valor de la carga sensible debida a la radiación solar a través de las superficies acristaladas (W);

Q_{str} es la carga sensible por transmisión y radiación a través de paredes y techos exteriores (W);

Q_{st} es la carga sensible por transmisión a través de paredes, techos, suelos y puertas interiores (W);

Q_{si} es la carga sensible transmitida por infiltraciones de aire exterior (W);

Q_{sai} es la carga sensible debida a aportaciones internas (W).

Por lo tanto, el cálculo de la carga sensible se basa en calcular cada una de las diferentes cargas anteriores y sumarmas, obteniéndose así el valor de la carga sensible total.

- **Carga por radiación solar a través de cristal " Q_{sr} "**

La radiación solar atraviesa las superficies traslúcidas y transparentes e incide sobre las superficies interiores del local, calentándolas, lo que a su vez incrementa la temperatura del ambiente interior.

La carga térmica por radiación a través de cristales y superficies traslúcidas (Q_{sr}) se calcula como sigue:

$$Q_{sr} = S * R * F \quad (2.2)$$

Donde,

Q_{sr} : es la carga térmica por radiación solar a través de cristal, en W.

S: es la superficie traslúcida o acristalada expuesta a la radiación, en m².

R: es la radiación solar que atraviesa la superficie, en W/m², correspondiente a la orientación, mes y latitud del lugar considerado. (Weather spark, 2023)

F: es el factor de corrección de la radiación en función del tipo de vidrio empleado en la ventana, efectos de sombras que pueda existir, etc. Este valor se puede obtener de las tablas incluidas en el documento CTE-DB HE Ahorro de energía. (Rodríguez, s.f.)

- **Carga por transmisión y radiación a través de paredes y techos exteriores "Q_{str}".**

La carga por transmisión y radiación que se transmite a través de las paredes y techos opacos que limitan con el exterior (Q_{str}) se calcula como sigue:

$$Q_{tsr} = K * S * (T_{ext} - T_{int}) \quad (2.3)$$

Donde,

Q_{str}: es la carga por transmisión a través de paredes y techos exteriores, en W.

K: es el coeficiente global de transmisión térmica del cerramiento, también llamado transmitancia térmica, expresado en W/m²°C. (iccl, s.f.)

S: es la superficie del muro expuesta a la diferencia de temperaturas, en m².

T_{int}: es la temperatura interior de diseño del local (°C)

T_{ext}: es la temperatura exterior de cálculo al otro lado del local (°C)

- **Carga por transmisión a través de paredes, techos, suelos y puertas interiores "Q_{st}".**

La carga por transmisión a través de los cerramientos interiores del local que lo limitan con otras estancias del edificio (Q_{st}) se calcula aplicando la expresión siguiente:

$$Q_{st} = K * S * (T_{ext} - T_{int}) \quad (2.4)$$

Donde,

Q_{st}: es la carga por transmisión a través de los cerramientos interiores, en W.

K: es el coeficiente global de transmisión térmica del cerramiento, también llamado transmitancia térmica, expresado en W/m²°C. (iccl, s.f.)

S: es la superficie del cerramiento interior, en m².

T_e: es la temperatura de diseño al otro lado del cerramiento (°C).

T_i: es la temperatura interior de diseño del local (°C).

- **Carga transmitida por infiltraciones de aire exterior "Q_{si}".**

La carga transmitida por infiltraciones y ventilación de aire exterior (Q_{si}) se determina mediante la siguiente expresión:

$$Q_{si} = V * \rho * C_{esp \text{ aire}} * \Delta T \quad (2.5)$$

Donde,

Q_{si} : es la carga térmica por infiltración y ventilación de aire exterior (W);

V: es el caudal de aire infiltrado y de ventilación (m^3/s);

P: es la densidad del aire, de valor $1,18 \text{ kg}/m^3$;

$C_{esp \text{ aire}}$: es el calor específico del aire, de valor $1012 \text{ J}/\text{kg } ^\circ\text{C}$;

ΔT : es la diferencia de temperaturas entre el ambiente exterior e interior.

- **Carga sensible por aportaciones internas " Q_{sai} ".**

La ganancia de carga sensible debida a las aportaciones internas del local (Q_{sai}) se determina a su vez como suma de las siguientes tipos de cargas que se generan dentro del mismo:

$$Q_{sai} = Q_{sil} + Q_{sp} + Q_{se} \quad (2.6)$$

Donde,

Q_{sil} : es el valor de la ganancia interna de carga sensible debida a la iluminación interior del local (W);

Q_{sp} : es la ganancia interna de carga sensible debida a los ocupantes del local (W);

Q_{se} : es la ganancia interna de carga sensible debida a los diversos aparatos existentes en el local, como aparatos eléctricos, ordenadores, etc. (W).

Carga sensible por iluminación (Q_{sil}).

Para el cálculo de la carga térmica sensible aportada por la iluminación interior del establecimiento se considerará que la potencia íntegra de las lámparas de iluminación se transformará en calor sensible.

En el caso de las lámparas de tipo fluorescente o de descarga se multiplicará la potencia total de todas las lámparas por 1,25 para considerar el consumo complementario de las reactancias.

- Lámparas incandescentes:

$$Q_{sil, incandescente} = n * Pot_{Lámp. incandescente} \quad (2.7)$$

Siendo n el número de lámparas de tipo incandescentes colocadas.

- Lámparas de descarga o fluorescentes:

$$Q_{sil, descarga} = 1.25 * n * Pot_{Lámp. descarga} \quad (2.8)$$

Siendo n el número de lámparas fluorescentes colocadas.

La ganancia de carga sensible por iluminación se obtendrá como la suma de las anteriores:

$$Q_{sil} = Q_{sil, incandescente} + Q_{sil, descarga} \quad (2.9)$$

Carga sensible por ocupantes (Q_{sp}).

Para calcular la carga sensible que aporta cada persona (Q_{sp}), es necesario conocer previamente las distintas cargas térmicas que origina:

- Radiación: debido a que la temperatura media del cuerpo es superior a la de los objetos que le rodean.
- Convección: ya que la superficie de la piel se encuentra a mayor temperatura que el aire que la rodea, creándose pequeñas corrientes de convección que aportan calor al aire.
- Conducción: originada a partir del contacto del cuerpo con otros elementos que le rodeen.
- Respiración: lo que origina un aporte de calor por el aire exhalado, que se encuentra a mayor temperatura. Aquí se produce también un aporte de vapor de agua que aumentará la humedad relativa del aire.
- Evaporación cutánea: este aporte de calor puede ser importante en verano.

La carga por ocupación tiene, por tanto, una componente sensible y otra latente, debido ésta última tanto a la respiración como a la transpiración. En ambos casos habrá que tener en cuenta el número de ocupantes de la estancia.

En la tabla siguiente se indican los valores de calor latente y sensible, en kcal/h, desprendido por una persona según la actividad y la temperatura existente en el local:

ACTIVIDAD REALIZADA	28 °C		27 °C		26 °C		24 °C	
	Sensible	Latente	Sensible	Latente	Sensible	Latente	Sensible	Latente
Sentado en reposo. Escuela.	45	45	50	40	55	35	60	30
Sentado trabajo ligero. Instituto.	45	55	50	50	55	45	60	40
Oficinista, actividad ligera.	45	70	50	65	55	60	60	50
Persona de pie. Tienda.	45	70	50	75	55	70	65	60
Persona que pasea. Banco.	45	80	50	75	55	70	65	60
Trabajo sedentario.	50	90	55	85	60	80	70	70
Trabajo ligero taller.	50	140	55	135	60	130	75	115
Persona que camina.	55	160	60	155	70	145	85	130
Persona que baila.	70	185	75	175	85	170	95	155
Persona en trabajo penoso.	115	250	120	250	125	245	130	230

Tabla 2: Calor sensible y latente desprendido por personas

La expresión para obtener el calor sensible de aporte por la ocupación del local sería la siguiente:

$$Q_{sp} = n * C_{sensible, persona} \quad (2.10)$$

Siendo,

n: es el número de personas que se espera que ocupen el local;

$C_{sensible, pers}$ es el calor sensible por persona y actividad que realice, según la tabla 1.

Carga sensible por aparatos eléctricos (Q_{se}).

Para el cálculo de la carga térmica aportada por la maquinaria, equipos y demás electrodomésticos presentes en el espacio climatizado del local se considerará que la potencia integra de funcionamiento de las máquinas y equipos presente en ese recinto se transformará en calor sensible.

Por otro lado, todos los equipos y electrodomésticos se considera que no funcionarán todos a la vez, por lo que se le afectará de un coeficiente de simultaneidad del 0,75 a la suma obtenida de todas las potencias.

- **Carga sensible total " Q_s ".**

La carga sensible total (Q_s) aportada al local es la suma de todas las anteriores:

$$Q_s = Q_{sr} + Q_{str} + Q_{st} + Q_{si} + Q_{sil} + Q_{sp} + Q_{se} \quad (2.11)$$

2.3.2 Cálculo de la carga térmica latente.

Expresión general.

Para el cálculo de la carga térmica latente (Q_l) se emplea la siguiente expresión:

$$Q_l = Q_{li} + Q_{lp} \quad (2.12)$$

Donde,

Q_{li} es la carga latente transmitida por infiltraciones de aire exterior (W);

Q_{lp} es la carga latente debida a la ocupación del local (W).

Por lo tanto, el cálculo de la carga latente se basa en calcular cada una de las diferentes cargas anteriores y sumarlas, obteniéndose así el valor de la carga latente total. Y esto es precisamente lo que se va a realizar en los próximos apartados.

- **Carga latente transmitida por infiltraciones de aire exterior " Q_{li} ".**

La carga latente transmitida por infiltraciones y ventilación de aire exterior (Q_{li}) se determina mediante la siguiente expresión:

$$Q_{li} = V * \rho * C_{esp \text{ agua}} * \Delta w \quad (2.13)$$

Donde,

Q_{li} : es la carga térmica latente por ventilación de aire exterior (W)

V: es el caudal de aire infiltrado y ventilación (m^3/s);

ρ : es la densidad del aire, de valor $1,18 \text{ kg/m}^3$;

$C_{esp, \text{ agua}}$ es el calor específico del agua, de valor 2257 kJ/kg ;

Δw : es la diferencia de humedad absoluta entre el ambiente exterior e interior.

De esta manera, una vez obtenido el caudal de ventilación de aire del exterior que entra en el local y aplicando la formulación anterior se puede obtener la carga térmica latente debida a ventilación e infiltración en el local.

- **Carga latente por ocupación " Q_{lp} ".**

La carga latente por ocupación del local (Q_{lp}) se determina multiplicando la valoración del calor latente emitido por la persona-tipo y por el número de ocupantes previstos para el local.

Como se ha visto, en la anterior tabla 1 se indican los valores de calor latente y sensible, en kcal/h, desprendido por una persona según la actividad y la temperatura existente en el local.

La expresión para obtener el calor latente de aporte por la ocupación del local sería la siguiente:

$$Q_{lp} = n * C_{latente, persona} \quad (2.14)$$

Siendo,

n es el número de personas que se espera que ocupen el local;

$C_{latente, persona}$ es el calor latente por persona y actividad que realice, según la tabla 2.

- **Carga latente total " Q_l ".**

La carga latente total (Q_l) aportada al local es la suma de todas las anteriores:

$$Q_l = Q_{li} + Q_{lp} \text{ (Rodríguez, s.f.)}$$

2.4 Cargas térmicas de los locales.

Los planos se encuentran al final del trabajo. (ANEXO E)

Utilizando el modelo descrito anteriormente y las dimensiones de los locales, de acuerdo con los planos del edificio que se muestran en el Anexo E, se determinan las cargas térmicas, para cada tipo de habitación (tabla 3). Se asume un factor de seguridad de un 20% y se muestra, además, la demanda de climatización para las 8 horas de trabajo.

Tabla 3: Cálculo cargas térmicas para cada tipo de local.

Area útil (m2)	Volumen (m3)	Cantidad de Personas	Carga térmica calculada (kW) +FS (20 %)	Demanda de climatización (Wh)(8 horas)
15	49.5	5	6.263	50104
20	66	10	6.612	52896
24	79.2	12	6.864	54912
30	99	15	7.241	57928
50	166.5	25	8.25	66000
660	198	30	8.524	68192

Se calcula además el consumo de energía mensual debido a la climatización de los 20 locales descritos en la tabla 1, considerando 24 días laborables en el mes (tabla 4).

Tabla 4: Demanda de climatización mensual (kWh) por aires acondicionados en los 20 locales estudiados del edificio.

Locales	15 m ²	20 m ²	24 m ²	30 m ²	50 m ²	60 m ²	Total
Espacios Coworking	0.0	0.0	0.0	5561.1	3168.0	0.0	8729.1
TICS Aplicadas	0.0	0.0	0.0	4170.8	1584.0	0.0	5754.8
Laboratorios PMV	0.0	0.0	2635.8	0.0	0.0	0.0	2635.8
Centro de Entendimiento	0.0	0.0	0.0	1390.3	1584.0	0.0	2974.3
Centro de eventos	1202.5	1269.5	0.0	0.0	0.0	3273.2	5745.2
Centro de entendimiento	0.0	0.0	0.0	1390.3	1584.0	0.0	2974.3
Total	1202.5	1269.5	2635.8	12512.4	7920.0	3273.2	28813.4

La demanda de climatización total en el año, es de 28,8 MWh. Se recomienda utilizar aires acondicionados Split para cada habitación con SEER (Seasonal Energy

Efficiency Ratio) = 13. Por tanto, el consumo eléctrico mensual será de 2.22 MWh (28.8 MWh/13).

CONCLUSIONES PARCIALES.

1. Se realiza el calculo de las cargas térmicas para 20 locales del futuro Centro de Gestión del Conocimiento y la Innovación.
2. La demanda de climatización mensual por aires acondicionados en los 20 locales estudiados del edificio es de 28.8 MWh.
3. Si se utilizan equipos acondicionadores de aire tipo Split con SEER=13, para la climatización de los locales, el consumo de energía del edificio se incrementa en 2.22 MWh en mes por este concepto.

Capítulo 3. Free-cooling con materiales de cambio de fase para edificio.

3.1 Introducción.

La selección de un material de cambio de fase (PCM) adecuado para un sistema de free cooling activo, depende de varias propiedades del material: Punto de Fusión, el PCM debe tener un punto de fusión que esté cerca de la temperatura de confort deseada para el espacio a enfriar; Calor Latente: debe tener un alto calor latente de fusión, lo que significa que pueden almacenar y liberar una mayor cantidad de energía durante el proceso de cambio de fase; Conductividad Térmica: facilitará una transferencia de calor más eficiente; Toxicidad e Inflamabilidad: debe ser seguro para su uso, no tóxico y no inflamable; Costo y Disponibilidad: hay que considerar su costo y disponibilidad en el mercado.

Un sistema de freecooling activo debe ser eficiente y adecuarse a las necesidades del proyecto. Los parámetros que son necesarios conocer para su selección o diseño son: Temperatura Exterior: el sistema debe activarse cuando la temperatura del aire exterior es más baja que la interior, aprovechando así el enfriamiento natural; Caudal de Aire: es necesario un caudal de aire adecuado para disipar las cargas internas y mejorar la calidad del aire interior; Control del Sistema: Los sistemas de climatización deben estar equipados con compuertas, ventiladores y un sistema de control para ajustar las condiciones de humedad y temperatura con eficiencia energética; Aplicaciones: se deben considerar las aplicaciones específicas del edificio y determinar la carga latente y sensible; Consumo Eléctrico: aunque el free cooling reduce el consumo de energía, aún requiere electricidad para los ventiladores, compuertas y filtros; Compatibilidad con Sistemas Existentes: se debe verificar que el sistema de free cooling sea compatible con los sistemas de climatización existentes; Eficiencia Energética: evaluar la eficiencia energética del sistema y cómo puede contribuir a la reducción del consumo de energía en el edificio; Impacto Ambiental: considerar el impacto ambiental del sistema y cómo puede ayudar a cumplir con protocolos y regulaciones medioambientales.

Para la combinación de estas dos tecnologías, se debe tener en cuenta, además, la integración del intercambiador de calor del depósito de PCM con el sistema de climatización existente y el flujo de aire de los ventiladores. Aunque es posible realizar

un análisis a partir de los balances de energía total, es recomendable realizar una simulación del sistema para prever su comportamiento bajo diferentes condiciones operativas y climáticas.

3.2 Almacenamiento de energía en PCM.

La cantidad de energía que puede almacenarse estará dada por la suma del calor sensible más el latente del cambio de fase:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m C_p dT + m am \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} m C_p dT \quad (3.1)$$

$$Q = m [C_{sp} (T_m - T_i) + am \Delta h_m + C_{ip} (T_f - T_m)] \quad (3.2)$$

Donde;

m Masa del material de cambio de fase (Kg).

am Fracción de PCM en estado líquido (en proceso de descarga) o sólido (en proceso de carga).

Ti Temperatura inicial del PCM (K).

Tm Temperatura de cambio de fase del PCM (K).

Δh_m Calor latente de cambio de fase del PCM (kJ).

Csp Calor específico promedio del PCM entre las temperaturas Tm y Ti (kJ/kgK).

Cip Calor específico promedio del PCM entre las temperaturas Tf y Tm (kJ/kgK).

En la ecuación 3.1, el primer y tercer término de la derecha representa el calor sensible que se almacenará (en el caso del paso de estado sólido a líquido) o será aportado al medio de enfriamiento, cuando el cambio de estado sea del líquido al sólido. Para los efectos del análisis que se realiza en este trabajo, no se tendrán en cuenta, utilizándose sólo el segundo término de dicha ecuación. Se considera, además, que la eficiencia del proceso de intercambio de calor del aire con el PCM tendrá un 100% de efectividad, por tanto, de acuerdo con 3.3 y 3.4, el rendimiento de los procesos de carga y descarga, también será de 100%. Como consecuencia de esto el término am que aparece en la ecuación 3.1 y 3.2 será igual a la unidad, es decir, se considera que todo el PCM cambia de fase en los procesos de carga y de descarga.

$$\eta_{carga} = \frac{\int Q_{alm} dt}{\int Q_{sum}} = \frac{Q_{alm}}{Q_{sum}} \quad (3.3)$$

$$\eta_{descarga} = \frac{\int Q_{usad} dt}{\int Q_{alm} dt} = \frac{Q_{usad}}{Q_{alm}} \quad (3.4)$$

Donde;

η_{carga} , (descarga) Rendimiento del proceso de carga (descarga) del PCM.

Q_{alm} , sum , $usad$ Cantidad de calor almacenado, suministrado o usado durante los procesos de carga y descarga del PCM (kJ).

$$\% E_{ah} = \frac{E_{cspcm} - E_{cpcm}}{E_{cspcm}} * 100 \quad (3.5)$$

Donde;

$\% E_{ah}$ Porcentaje de energía ahorrada.

E_{cspcm} Energía consumida por el sistema sin PCM (kJ, kWh).

E_{cpcm} Energía consumida por el sistema con PCM (kJ, kWh).

Teniendo en cuenta las simplificaciones descritas anteriormente, el balance de energía en el proceso de intercambio de calor entre el aire suministrado por el sistema freecooling y los PCM, puede escribirse de la siguiente forma:

$$Q_a = Q_{lPCM} \quad (3.6)$$

Donde;

Q_a Calor absorbido por el aire (proceso de carga PCM) o rechazado en proceso de descarga.

Q_{lPCM} Calor latente de cambio de fase.

$$Q_a = m_a * C_{pa}(T_a - T_m) \quad (3.7)$$

$$Q_{lPCM} = m_{PCM} * h \quad (3.8)$$

Donde;

m_a PCM masa de aire (PCM) en los procesos de carga o descarga (Kg).

C_{pa} Calor específico a presión constante del aire a temperatura T_a (kJ/kgK).

h Calor latente de cambio de estado del PCM (kJ/kg).

El aire es impulsado por el ventilador del freecooling, por tanto:

$$m_a = V_a \delta_a \Delta t \quad (3.8)$$

Donde;

V_a Flujo volumétrico del aire en el free cooling (m^3/s).

δ_a Densidad del aire a la temperatura T_a (Kg/m^3).

Δt Tiempo total de cambio de fase del PCM (s). (Sharma, Tyagi, Chen, & Buddhi, 2009)

Para que ocurra la carga del sistema, es decir, que toda la masa de PCM pase a estado sólido, se necesita que la temperatura del aire sea menor que la temperatura media de cambio de fase durante el tiempo necesario para ocurra este proceso.

Para garantizar condiciones de confort, se necesita que la temperatura del local sea menor que 25 °C, entonces, se debe seleccionar un PCM cuya temperatura de cambio de fase sea igual o inferior a esta. Se debe entonces estudiar el comportamiento de la temperatura ambiente durante el año en Cienfuegos.

3.3 Estudio de la temperatura en la ciudad de Cienfuegos.

Para el estudio de la variación de la temperatura en el año en la ciudad de Cienfuegos se utilizan datos de este parámetro obtenidas por la estación meteorológica de la Provincia. Esta serie está formada por los valores de temperatura tomados cada 10 minutos durante todo el año. Son en total 52561 mediciones.

El análisis estadístico de esta serie de datos está encaminado a determinar si en el año se garantizan temperaturas inferiores a 25 °C durante un intervalo de tiempo (h) que posibilite el cambio de fase de los PCM en el freecooling.

Para facilitar el cálculo de los estadígrafos de prueba, se evalúa si la distribución de la media de las temperaturas por hora se ajusta a una distribución normal utilizando el criterio de Kolmogorov-Smirnov. De acuerdo con los resultados del cálculo de

estadígrafo (véase Tabla A.3), se puede rechazar la hipótesis de que los datos se ajustan a una distribución normal, con un nivel de confianza del 99%.

Como los datos no se ajustan a la distribución teórica analizada, se debe calcular la probabilidad de que la temperatura sea menor que un valor dado, utilizando otros métodos. Dentro de ellos los más difundidos son: el método empírico, el cual se basa en la frecuencia relativa de los eventos; la estimación de la densidad del núcleo (KDE); el método de Monte Carlo y el método Bootstrat.

En este estudio se utilizará el método empírico. Para determinar la frecuencia relativa con que se presenta un valor de temperatura en el año, se construye el histograma de frecuencias para cada hora y la frecuencia relativa acumulada (figuras B.1 y B.2). La probabilidad que la temperatura sea menor que 24 °C, 25 °C y 26 °C, se muestran en la tabla (B.1).

Al multiplicar esta probabilidad por la cantidad de días en el período analizado (en este caso todo el año), se obtiene el tiempo (en días) en que la temperatura ambiente será menor que la especificada (tabla B.1).

La carga del PCM debe ocurrir fuera del horario en que se utiliza para disminuir la carga térmica del local. Por tanto, para el análisis del proceso de carga utilizaremos las horas desde las 00:00 hasta las 07:00. Se observa que para este período de tiempo, las temperaturas serán menor que 24 °C, entre 179 y 253 días del año, menor que 25 °C, entre 253 y 353 días y menor que 26°C, entre 314 y 354 días.

Un estudio histórico de la temperatura en Cienfuegos, utilizando datos entre el 2015 y el 2023, presentado por Weather Spark (Weather spark, 2023), se muestra en la figura C.1. Se observa que de enero a mayo, noviembre y diciembre, las temperaturas en el horario analizado, se mantiene entre 18 °C y 24 °C, pero en el período de mayo a noviembre, pueden llegar incluso a los 29 °C. Es necesario entonces, estudiar ese período de tiempo.

Para ello, se realiza el mismo procedimiento descrito anteriormente, obteniéndose la tabla C.1. En este caso la probabilidad de que la temperatura sea inferior a 24 °C es muy baja (entre el 28 y el 50%), no obstante, es posible que la temperatura sea menor que 25 °C, entre 159 y 100 días de los 183 de este período de tiempo.

3.4 Selección del PCM.

Existen varias empresas que comercializan materiales de cambio de fase. Para este análisis se utilizaron los productos que comercializa la empresa Rubitherm (Rubitherm, 2023), los cuales ofertan una variedad muy versátil de PCM macro encapsulados.

Teniendo en cuenta el análisis realizado en el epígrafe anterior, se observan dos PCM que cumplen con las condiciones previstas de trabajo (figuras D.1 y D.2). De ellos se considera utilizar el RT26, cuya temperatura media de cambio de fase es 25.5 °C, con una capacidad de almacenamiento de calor de 180 kJ/kg (50 Wh/kg). Este material es orgánico, con una alta capacidad de almacenamiento de energía, de larga vida útil, es fácil de manipular y no es tóxico.

Esta empresa comercializa además las macro cápsulas de aluminio y el equipo de Free-cooling (figura D.5), que incluye las válvulas para la gestión de la entrada y salida de aire y el filtro. La capacidad del equipo es de 10 macro cápsulas. En el caso del material seleccionado estas macro cápsulas contienen 2 kg cada una.

3.5 Selección de los ventiladores para el Free-cooling.

Para la selección de los ventiladores del sistema Free-cooling, se calcula cuál sería el flujo de aire necesario para lograr el paso de la fase líquida a sólida del PCM a una temperatura de 25.5 °C. Para el análisis se considera que la temperatura del aire será de 24.5 °C, es decir un grado inferior que la media de cambio de fase. Utilizando las ecuaciones 3.5 a 3.8, se obtiene que con un flujo de aire de 550 m³/h, se logra el cambio de estado de 10 kg de PCM en 6 horas. Un ventilador con estas características se muestra en la figura D.4.

Para garantizar el cambio al estado sólido del PCM es necesario 6 horas de funcionamiento del ventilador, que tiene una potencia de 60 W, se necesita consumir 0.36 kWh diariamente. En el mes representa 6,24 kWh, que comparado con los 2,22 MWh que se consumen en climatización, no es un valor representativo.

3.6 Consumo de energía del sistema Free cooling+PCM+Climatización.

El efecto del PCM en los sistemas de enfriamiento gratis, depende de la capacidad de almacenamiento de calor útil y del flujo de calor, que es proporcional a la diferencia de temperatura entre el aire y el PCM. Además, se debe tener en cuenta la intermitencia del sistema en función de los cambios de temperatura de la habitación a climatizar. En la figura 10 se muestran dos casos, uno en que la temperatura media de la habitación es igual a la temperatura media de cambio de fase del PCM y cuando no fluctúa uniformemente. Se observa que, en caso simétrico, el PCM modula los cambios de temperatura de la habitación que están fuera del rango de su temperatura de cambio de fase, lográndose una estabilidad térmica en el local. El segundo caso, puede limitar el valor máximo o mínimo de la temperatura del local. (Harald Mehling, 2008)

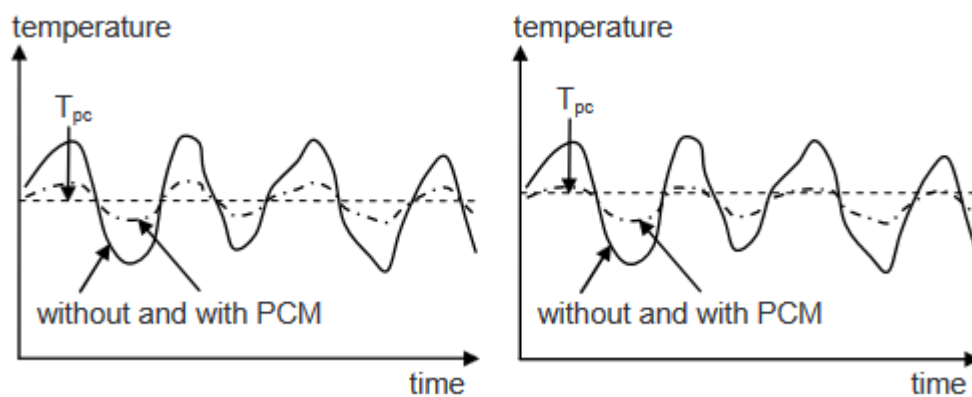


Figura 10. Izquierda: un PCM con una temperatura de fusión a la temperatura media amortigua las fluctuaciones de temperatura. Derecha: un PCM con una temperatura de fusión más alta corta los picos de temperatura.

Para combinar la climatización con el free-cooling activo utilizando PCM se propone utilizar una unidad en cada local. La empresa Imtech / Alemania ha desarrollado tal unidad desde 2004 (Figura 11). Con este principio funcionan la mayoría de las unidades que se comercializan en la actualidad. La unidad de ventilación descentralizada utiliza un almacenamiento de calor latente para almacenar el frío del aire nocturno y utilizarlo para la refrigeración del espacio durante el día.

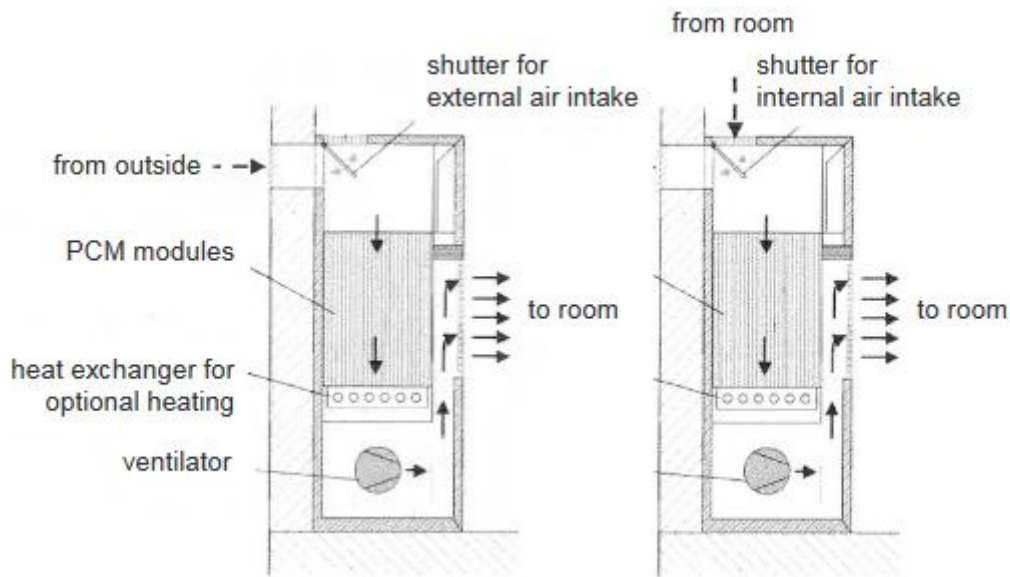


Fig. 11 Esquema de la unidad de enfriamiento y ventilación. Izquierda: enfriamiento de la unidad con aire frío nocturno. Derecha: enfriamiento del aire desde dentro de la habitación (imágenes: Imtech).<http://www.imtech.es/>)

Los módulos de PCM macroencapsulados en placas, se insertan en el canal de aire, de forma paralela al flujo de este. Cuando el sistema está en modo de ventilación y enfría el PCM y la habitación con aire nocturno. Una persiana en la parte superior de la unidad cambia entre la entrada de aire externo para la ventilación y el aire interno para la refrigeración del espacio. Durante el día, como se muestra a la derecha, la unidad aspira aire caliente de la habitación, lo enfría mientras pasa por el almacenamiento y suministra el aire enfriado de vuelta a la habitación. Opcionalmente, el sistema también puede permanecer en modo de ventilación y aspirar aire fresco del exterior, enfriarlo en el almacenamiento y suministrar el aire fresco enfriado a la habitación. El movimiento del aire se realiza mediante un ventilador en la parte inferior de la unidad, que puede mover el aire a una velocidad variable. Esto permite regular el flujo de aire y, por lo tanto, la potencia de enfriamiento.

Realizando un balance de energía del sistema, es posible estimar la cantidad de energía que será capaz de absorber, y por tanto determinar la magnitud del ahorro de energía.

Es importante destacar, que la carga térmica calculada para cada local, se obtuvo para las condiciones de mayor temperatura y radiación solar. Además, se tuvo en cuenta un factor de seguridad de el 20%. Esta carga térmica es poco probable que se alcance. De acuerdo con el análisis de la temperatura ambiente, es posible que se

alcancen temperaturas inferiores a 25 °C, en el horario laboral (08:00 a 18:00), y se pudieran refrigerar los locales con aire exterior, lo cual trae aparejado la disminución del consumo. Sin embargo, la cuantificación con mayor aproximación a la realidad, de estos ahorros energéticos, sólo es posible si se realiza la simulación de del funcionamiento de todo el sistema. Este tipo de análisis no estaba previsto en el marco de este trabajo.

La tabla 5, muestra las magnitudes del porcentaje de energía eléctrica que se puede ahorrar, debido a la absorbida por los PCM al cambiar de fase. Para esto se considera que el sistema de Free-cooling comienza a recircular el aire de la habitación a través de los PCM, cuando la temperatura de esta es superior a la temperatura media de cambio de fase en 1 K. Para el cálculo de la energía eléctrica consumida, se asume que los aires acondicionados a utilizar serán unidades de tipo Split con SEER igual a 13.

Tabla 5. Ahorro de energía eléctrica (diario) (%) al utilizar el Free-cooling con PCM.

Locales	15 m ²	20 m ²	24 m ²	30 m ²	50 m ²	60 m ²	Total
Espacios Coworking	0.00	0.00	0.00	8.63	7.58	0.00	8.25
TICS Aplicadas	0.00	0.00	0.00	8.63	7.58	0.00	8.34
Laboratorios PMV	0.00	0.00	9.11	0.00	0.00	0.00	9.11
Centro de Entendimiento	0.00	0.00	0.00	8.63	7.58	0.00	8.07
Centro de eventos	9.98	9.45	0.00	0.00	0.00	7.33	8.35
Centro de entendimiento	0.00	0.00	0.00	8.63	7.58	0.00	8.07
Total	9.98	9.45	9.11	8.63	7.58	7.33	8.33

Una disminución de 8.33% de los 2.22 MWh que consume el sistema de climatización del edificio mensualmente, representa un ahorro de 0.18 MWh.

La tabla D.1, muestra el presupuesto estimado para la compra de los principales componentes del sistema propuesto. El costo total de €7563.6 (€378,18 por unidad) es alto comparado con el ahorro de electricidad. Es importante tener en cuenta que más que una acción de eficiencia energética, el sistema que se propone, será un laboratorio para ensayos de esta tecnología con vistas a diseñar un prototipo, que incluya, además, el control automático de la instalación, que se ajuste a las condiciones climatológicas de nuestro País.

CONCLUSIONES PARCIALES

1. Se utiliza el balance de energía entre las placas de PCM y el aire del Free-cooling para determinar las posibilidades de ahorro de energía. No se tiene en cuenta el proceso de transferencia de calor, considerando que todo el calor latente del cambio de estado es absorbido por el aire en el proceso de solidificación del PCM o absorbido por este cuando enfría el aire del local climatizado.
2. Se utilizará como PCM macro encapsulado, el RT26, cuya temperatura media de cambio de fase es 25.5 °C, con una capacidad de almacenamiento de calor de 180 kJ/kg (50 Wh/kg). Este material es orgánico, con una alta capacidad de almacenamiento de energía, de larga vida útil, es fácil de manipular y no es tóxico.
3. Para el análisis se considera que la temperatura del aire será inferior a 25 °C y se obtiene, que con un flujo de aire de 550 m³/h, se logra el cambio de estado de 20 kg de PCM en 6 horas.
4. El consumo de energía eléctrica debido a la climatización tendrá una disminución mensual de 8.33% al utilizar la tecnología propuesta, que representa un ahorro de 0.18 MWh.
5. El sistema propuesto será un laboratorio para ensayos de esta tecnología con vistas a diseñar prototipos, que se ajusten a las condiciones climatológicas de nuestro País.

CONCLUSIONES

1. El estudio bibliográfico permite concluir que el uso de materiales de cambio de fase en sistema de climatización con apoyo de free-cooling activo, posibilita el incremento de la eficiencia energética de edificaciones en las condiciones climáticas de Cuba.
2. La demanda de climatización mensual de los veinte locales previstos es de 28813.4 kWh, lo cual representa al utilizar equipos de climatización tipo Split con SEER=13, un consumo de electricidad de 2.22 MWh.
3. Del análisis estadístico de las temperaturas de la ciudad de Cienfuegos en el horario de la madrugada, serán menor que 24 °C, entre 179 y 253 días del año, menor que 25 °C, entre 253 y 353 días y menor que 26°C, entre 314 y 354 días. En los meses más cálidos (mayo a noviembre), la probabilidad de que la temperatura sea inferior a 24 °C es muy baja (entre el 28 y el 50%); y que sea menor que 25 °C, entre 159 y 100 días de los 183 de este período de tiempo, lo cual garantiza la solidificación de los PCM.
4. Se selecciona un sistema de climatización combinando el uso del Free-cooling activo, con 10 placas de PCM RT26, de 2 kg cada una y un ventilador de 550 m³/h, con un costo de €378,18 por unidad.
5. Aunque el objetivo fundamental de la instalación de esta tecnología será su evaluación y ajuste a las condiciones climáticas de Cuba, su uso en los 20 locales previstos, traería un ahorro mínimo de energía igual a 0.18 MWh en el mes.

RECOMENDACIONES

1. Realizar la simulación del funcionamiento del sistema Free-cooling activo con placas de PCM y el aire acondicionado, en función del cambio de las cargas térmicas durante el año

BIBLIOGRAFÍA

- Abhat, A. (2023). Low temperature latent heat thermal energy storage, Heat storage materials. *Solar Energy*, 313-332. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(83\)90186-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(83)90186-X)
- BBVA. (2023). BBVA https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/como-encontrar-el-sistemadeclimatizacionmassostenible/?_gl=1*7x627t*_ga*NTg2NDc4MjM2LjE2OTU3NAwMjI.*_ga_915V905T16*MTY5NTc1MDAyMS4xLjEuMTY5NTc1MDA1Ni4yNS4wLjA.
- Butala, V., & Stritih, U. (2009). Experimental investigation of PCM cold storage, Energy and Buildings. *Sciencedirect*, 41, 354-359. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.10.008>
- Datum Corporation, (2020). *Cottes Trust Beyond Innovation*. <https://www.cottesgroup.com/blog/free-cooling>
- Dincer, & Rosen. (2013). Thermodynamic modeling and multi-objective evolutionary-based optimization of a new multigeneration energy system, Energy Conversion and Management. *Sciencedirect*, 76, 282-300. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.049>
- IROYAZ. (2020). *LA UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS SE PROPONE UN CENTRO GESTOR DE CONOCIMIENTO Y LA INNOVACIÓN, APROVECHANDO UN EDIFICIO DE BECAS EXISTENTE*. Cienfuegos.
- Jiao, F., & Xu, P. (2015). Simulation and feasibility analysis of PCM based passive cooling technique in residential house. Procedia Engineering . *Sciencedirect*, 121, 1969-1976. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.189>
- Jímenez, I. (2022). *CLIMATIZACIÓN MEDIANTE FREE COOLING DE UN CENTRO DE PROCESO DE DATOS*. (Trabajo de Grado), Universidad Europea de Madrid, https://titula.universidadeuropea.com/bitstream/handle/20.500.12880/2074/tfg_jimenezgrechignacio.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Lund, J., & Boyd, I. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review, Geothermics. *Sciencedirect*, 66-93. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
- Maxgrowshop. (2023). Maxgrowshop. <https://maxgrowshop.com/product-eng-178-TT160-Inline-fan-552m3-h.html>
- Muthuvelan, T. (2018). Experimental investigation of free cooling using phase change material-filled air heat exchanger for energy efficiency in buildings, Advances in Building Energy Research. *Taylor and Francis Online*, 12. <https://doi.org/10.1080/17512549.2016.1248487>
- Panchabikesan, K., Mastani, M., & Haghighat, F. (2020). Feasibility study on the year-round operation of PCM based free cooling systems in tropical climatic conditions. *Energy*. *Sciencedirect*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116695>

- Prabhakar, M., Saffari, M., Gracia, A. d., & Cabeza, L. (2020). Improving the energy efficiency of passive PCM system using controlled natural ventilation, *Energy and Buildings*. *Sciencedirect*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110483>
- Real, A. (2017). *Modelización de sistemas de climatización con bomba de calor y depósito de cambio de fase. Validación experimental y optimización energética*. (Tesis doctoral), Universidad CEU Cardenal Herrera, Departamento de matemáticas, física y Ciencias tecnológicas, Valencia. <http://hdl.handle.net/10637/8582>
- Rehau. (2023). *Rehau*. <https://www.rehau.com/es-es/que-es-eficiencia-energetica-edificios>
- Rodríguez, H. (2023). *Ingemecánica*. *ingemecánica*: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn255.html>
- Rubitherm. (2023). *Rubitherm*: <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/makroverkaspelung-csm>
- Rubitherm. (2023). *Rubitherm*: www.rubitherm.eu
- Santosh, C., Rudrapati, R., & Manickam, S. (2022). A comprehensive review on current advances of thermal energy storage and its applications, *Alexandria Engineering Journal*. *Sciencedirect*, 61, 5455-5463. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.11.003>
- Sharma, A., Tyagi, V., Chen, C., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. *Sciencedirect*, 13, 318-345. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032107001402>
- Solgi, E. (2019). A parametric study of phase change material behaviour when used with night ventilation in different climatic zones, *Build. Environ*. *Sciencedirect*, 147, 327-336. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.031>
- Torroja, (2023). *ICCL. Sistemas Materiales*. <http://cteweb.iccl.es/sistemas.php?t=2&f=3>. <http://cteweb.iccl.es/materiales.php?a=10>
- Weather Spark. (2023). *Weather spark*. (<https://es.weatherspark.com>)
- Zalba, B. (2004). Free-cooling of buildings with phase change materials, *International Journal of Refrigeration*. *Sciencedirect*. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.03.015>
- Zeinelabdein, R., Omer, S., & Mohamed, E. (2020). The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food, *Journal of Energy Storage*. *Sciencedirect*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101972>

ANEXOS

Anexo A

Estadísticos descriptivos y prueba de normalidad para la temperatura ambiente en Cienfuegos por hora.

Tabla A.1: Resumen del procesamiento de los casos

Hora		Casos					
		Válidos		Perdidos		Total	
		N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
0	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
1	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
2	TempExt	2172	99.2%	18	.8%	2190	100.0%
3	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
4	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
5	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
6	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
7	TempExt	2176	99.4%	14	.6%	2190	100.0%
8	TempExt	2173	99.2%	17	.8%	2190	100.0%
9	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
10	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
11	TempExt	2176	99.4%	14	.6%	2190	100.0%
12	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
13	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
14	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
15	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
16	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
17	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
18	TempExt	2182	99.6%	8	.4%	2190	100.0%
19	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
20	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
21	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
22	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%
23	TempExt	2178	99.5%	12	.5%	2190	100.0%

Tabla A.2: Descriptivos

Hora			Estadístico	Error típ.
0	TempExt	Media	23.482	.0539
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	
			23.376	
			Límite superior	
			23.588	
		Media recortada al 5%	23.583	
		Mediana	24.100	
		Varianza	6.323	
		Desv. típ.	2.5146	
		Mínimo	14.1	
		Máximo	29.1	
		Rango	15.0	

1	TempExt	Amplitud intercuartil		3.5	
		Asimetría		-.660	.052
		Curtosis		.147	.105
		Media		23.233	.0541
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	23.127	
			Límite superior	23.339	
		Media recortada al 5%		23.352	
		Mediana		23.800	
		Varianza		6.378	
		Desv. típ.		2.5255	
		Mínimo		13.9	
		Máximo		28.9	
		Rango		15.0	
		Amplitud intercuartil		3.6	
		Asimetría		-.715	.052
		Curtosis		.163	.105
		Media		22.982	.0548
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	22.875	
			Límite superior	23.090	
2	TempExt	Media recortada al 5%		23.114	
		Mediana		23.700	
		Varianza		6.533	
		Desv. típ.		2.5560	
		Mínimo		14.5	
		Máximo		28.9	
		Rango		14.4	
		Amplitud intercuartil		3.7	
		Asimetría		-.738	.053
		Curtosis		.105	.105
		Media		22.784	.0548
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	22.677	
			Límite superior	22.892	
		Media recortada al 5%		22.913	
		Mediana		23.400	
		Varianza		6.550	
		Desv. típ.		2.5592	
		Mínimo		14.2	
		Máximo		28.8	
3	TempExt	Rango		14.6	
		Amplitud intercuartil		3.7	
		Asimetría		-.723	.052
		Curtosis		.055	.105
		Media		22.574	.0544
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	22.467	
			Límite superior	22.681	
		Media recortada al 5%		22.695	
		Mediana		23.200	
		Varianza		6.453	
		Desv. típ.		2.5404	
		Mínimo		14.0	

5	TempExt	Máximo		28.8	
		Rango		14.8	
		Amplitud intercuartil		3.6	
		Asimetría		-.699	.052
		Curtosis		.035	.105
		Media		22.370	.0543
		Intervalo de confianza	Límite inferior	22.264	
		para la media al 95%	Límite superior	22.477	
		Media recortada al 5%		22.485	
		Mediana		22.900	
		Varianza		6.433	
		Desv. típ.		2.5363	
		Mínimo		13.9	
		Máximo		28.7	
		Rango		14.8	
		Amplitud intercuartil		3.6	
		Asimetría		-.680	.052
		Curtosis		-.010	.105
6	TempExt	Media		22.209	.0547
		Intervalo de confianza	Límite inferior	22.102	
		para la media al 95%	Límite superior	22.317	
		Media recortada al 5%		22.322	
		Mediana		22.800	
		Varianza		6.513	
		Desv. típ.		2.5520	
		Mínimo		13.7	
		Máximo		28.6	
		Rango		14.9	
		Amplitud intercuartil		3.8	
		Asimetría		-.682	.052
		Curtosis		.066	.105
		Media		22.254	.0537
		Intervalo de confianza	Límite inferior	22.149	
		para la media al 95%	Límite superior	22.359	
		Media recortada al 5%		22.363	
		Mediana		22.900	
		Varianza		6.275	
		Desv. típ.		2.5049	
		Mínimo		13.6	
		Máximo		28.6	
		Rango		15.0	
		Amplitud intercuartil		3.6	
		Asimetría		-.675	.052
		Curtosis		.059	.105
8	TempExt	Media		23.444	.0512
		Intervalo de confianza	Límite inferior	23.344	
		para la media al 95%	Límite superior	23.544	
		Media recortada al 5%		23.545	
		Mediana		23.900	
		Varianza		5.694	

9	TempExt	Desv. típ.		2.3861	
		Mínimo		14.3	
		Máximo		29.0	
		Rango		14.7	
		Amplitud intercuartil		3.5	
		Asimetría		-.625	.053
		Curtosis		.076	.105
		Media		25.399	.0506
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	25.299	
			Límite superior	25.498	
		Media recortada al 5%		25.488	
		Mediana		25.650	
		Varianza		5.579	
		Desv. típ.		2.3619	
		Mínimo		16.8	
		Máximo		30.6	
		Rango		13.8	
		Amplitud intercuartil		3.5	
10	TempExt	Asimetría		-.540	.052
		Curtosis		-.147	.105
		Media		26.954	.0508
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	26.854	
			Límite superior	27.054	
		Media recortada al 5%		27.069	
		Mediana		27.300	
		Varianza		5.627	
		Desv. típ.		2.3721	
		Mínimo		18.3	
		Máximo		31.5	
		Rango		13.2	
		Amplitud intercuartil		3.5	
		Asimetría		-.620	.052
		Curtosis		-.129	.105
		Media		28.009	.0500
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	27.911	
			Límite superior	28.107	
11	TempExt	Media recortada al 5%		28.133	
		Mediana		28.400	
		Varianza		5.448	
		Desv. típ.		2.3340	
		Mínimo		19.3	
		Máximo		32.3	
		Rango		13.0	
		Amplitud intercuartil		3.4	
		Asimetría		-.717	.052
		Curtosis		.162	.105
		Media		28.793	.0501
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	28.695	
			Límite superior	28.891	
		Media recortada al 5%		28.914	
12	TempExt				

13	TempExt	Mediana		29.100	
		Varianza		5.458	
		Desv. típ.		2.3362	
		Mínimo		19.9	
		Máximo		33.2	
		Rango		13.3	
		Amplitud intercuartil		3.4	
		Asimetría		-.719	.052
		Curtosis		.281	.105
		Media		29.181	.0511
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	29.081	
			Límite superior	29.281	
		Media recortada al 5%		29.292	
		Mediana		29.300	
14	TempExt	Varianza		5.680	
		Desv. típ.		2.3834	
		Mínimo		20.3	
		Máximo		33.9	
		Rango		13.6	
		Amplitud intercuartil		3.5	
		Asimetría		-.639	.052
		Curtosis		.305	.105
		Media		29.216	.0520
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	29.114	
			Límite superior	29.319	
		Media recortada al 5%		29.314	
		Mediana		29.300	
		Varianza		5.900	
15	TempExt	Desv. típ.		2.4289	
		Mínimo		20.3	
		Máximo		34.1	
		Rango		13.8	
		Amplitud intercuartil		3.6	
		Asimetría		-.565	.052
		Curtosis		.349	.105
		Media		28.954	.0544
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	28.847	
			Límite superior	29.060	
		Media recortada al 5%		29.022	
		Mediana		29.050	
		Varianza		6.453	
		Desv. típ.		2.5402	
16	TempExt	Mínimo		20.4	
		Máximo		35.2	
		Rango		14.8	
		Amplitud intercuartil		3.6	
		Asimetría		-.388	.052
		Curtosis		.188	.105
		Media		28.406	.0561
		Intervalo de confianza	Límite inferior	28.296	

17	TempExt	para la media al 95%	Límite superior	28.516	
		Media recortada al 5%		28.463	
		Mediana		28.500	
		Varianza		6.858	
		Desv. típ.		2.6188	
		Mínimo		20.2	
		Máximo		35.2	
		Rango		15.0	
		Amplitud intercuartil		3.7	
		Asimetría		-.259	.052
		Curtosis		-.008	.105
		Media		27.702	.0576
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	27.589	
			Límite superior	27.815	
		Media recortada al 5%		27.759	
		Mediana		27.800	
		Varianza		7.228	
18	TempExt	Desv. típ.		2.6885	
		Mínimo		19.4	
		Máximo		34.6	
		Rango		15.2	
		Amplitud intercuartil		4.0	
		Asimetría		-.236	.052
		Curtosis		-.342	.105
		Media		26.869	.0598
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	26.752	
			Límite superior	26.986	
		Media recortada al 5%		26.924	
		Mediana		26.700	
		Varianza		7.804	
		Desv. típ.		2.7935	
		Mínimo		18.7	
		Máximo		33.0	
		Rango		14.3	
19	TempExt	Amplitud intercuartil		4.3	
		Asimetría		-.152	.052
		Curtosis		-.620	.105
		Media		26.092	.0604
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	25.973	
			Límite superior	26.210	
		Media recortada al 5%		26.144	
		Mediana		25.900	
		Varianza		7.951	
		Desv. típ.		2.8197	
		Mínimo		18.4	
		Máximo		32.4	
		Rango		14.0	
		Amplitud intercuartil		4.1	
		Asimetría		-.150	.052
		Curtosis		-.622	.105

20	TempExt	Media		25.289	.0587
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	25.174	
			Límite superior	25.404	
		Media recortada al 5%		25.355	
		Mediana		25.300	
		Varianza		7.503	
		Desv. típ.		2.7392	
		Mínimo		17.3	
		Máximo		31.1	
		Rango		13.8	
		Amplitud intercuartil		3.9	
		Asimetría		-.256	
		Curtosis		-.406	
21	TempExt	Media		24.661	.0571
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	24.549	
			Límite superior	24.773	
		Media recortada al 5%		24.727	
		Mediana		24.800	
		Varianza		7.091	
		Desv. típ.		2.6629	
		Mínimo		16.7	
		Máximo		30.2	
		Rango		13.5	
		Amplitud intercuartil		3.7	
		Asimetría		-.355	
		Curtosis		-.214	
22	TempExt	Media		24.179	.0552
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	24.071	
			Límite superior	24.287	
		Media recortada al 5%		24.256	
		Mediana		24.400	
		Varianza		6.628	
		Desv. típ.		2.5746	
		Mínimo		16.0	
		Máximo		29.5	
		Rango		13.5	
		Amplitud intercuartil		3.6	
		Asimetría		-.479	
		Curtosis		-.003	
23	TempExt	Media		23.814	.0541
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	23.707	
			Límite superior	23.920	
		Media recortada al 5%		23.913	
		Mediana		24.200	
		Varianza		6.385	
		Desv. típ.		2.5268	
		Mínimo		15.6	
		Máximo		29.2	
		Rango		13.6	
		Amplitud intercuartil		3.4	

Asimetría	-,612	,052
Curtosis	,149	,105

Tabla A.3: Pruebas de normalidad a Corrección de la significación de Lilliefors

Hora		Kolmogorov-Smirnov(a)			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
0	TempExt	,101	2178	,000	,967	2178	,000
1	TempExt	,108	2178	,000	,960	2178	,000
2	TempExt	,115	2172	,000	,953	2172	,000
3	TempExt	,110	2178	,000	,954	2178	,000
4	TempExt	,111	2178	,000	,955	2178	,000
5	TempExt	,105	2178	,000	,958	2178	,000
6	TempExt	,105	2178	,000	,957	2178	,000
7	TempExt	,109	2176	,000	,957	2176	,000
8	TempExt	,096	2173	,000	,969	2173	,000
9	TempExt	,068	2178	,000	,974	2178	,000
10	TempExt	,077	2178	,000	,961	2178	,000
11	TempExt	,087	2176	,000	,957	2176	,000
12	TempExt	,086	2178	,000	,958	2178	,000
13	TempExt	,074	2178	,000	,968	2178	,000
14	TempExt	,047	2178	,000	,977	2178	,000
15	TempExt	,033	2178	,000	,988	2178	,000
16	TempExt	,030	2178	,000	,992	2178	,000
17	TempExt	,046	2178	,000	,989	2178	,000
18	TempExt	,053	2182	,000	,984	2182	,000
19	TempExt	,061	2178	,000	,985	2178	,000
20	TempExt	,052	2178	,000	,987	2178	,000
21	TempExt	,053	2178	,000	,986	2178	,000
22	TempExt	,066	2178	,000	,982	2178	,000
23	TempExt	,086	2178	,000	,973	2178	,000

Anexo B.

Estudio del comportamiento de la temperatura ambiente en Cienfuegos durante todo el año.

Tabla B.1: Probabilidad de que la temperatura en Cienfuegos (%), durante el año, alcance valores menores que 24,25 y 26 °C y lo que representa en días con esas temperaturas.

Hora	P(Ta<24)	P(Ta<25)	P(Ta<26)	Días T<24	Días T<25	Días T<26
0:00	49.2	69.7	86.5	179	253	314
1:00	52.2	74.1	89.4	189	269	325
2:00	55.6	77.4	91.7	202	281	333
3:00	60.2	80.4	94.8	219	292	344
4:00	64.3	84.4	96.8	233	307	352
5:00	67.6	88.2	97.2	245	320	353
6:00	69.6	91.6	97.3	253	333	353
7:00	69.3	91.5	97.4	252	332	354
8:00	50.5	70.5	88.2	183	256	320
9:00	26.3	40.2	55.1	96	146	200
10:00	11.8	21.2	34.2	43	77	124
11:00	5.6	11.7	20.0	20	42	73
12:00	3.2	6.5	12.8	12	24	46
13:00	2.5	4.6	10.5	9	17	38
14:00	2.6	5.1	10.2	10	18	37
15:00	3.1	6.5	11.9	11	24	43
16:00	4.6	8.7	18.3	17	32	67
17:00	7.9	15.1	29.0	29	55	105
18:00	15.3	28.9	42.0	56	105	152
19:00	23.5	39.9	51.3	85	145	186
20:00	31.7	47.5	58.3	115	173	212
21:00	38.2	53.5	65.3	139	194	237
22:00	41.7	59.4	74.5	151	216	270
23:00	45.4	64.8	82.0	165	235	298

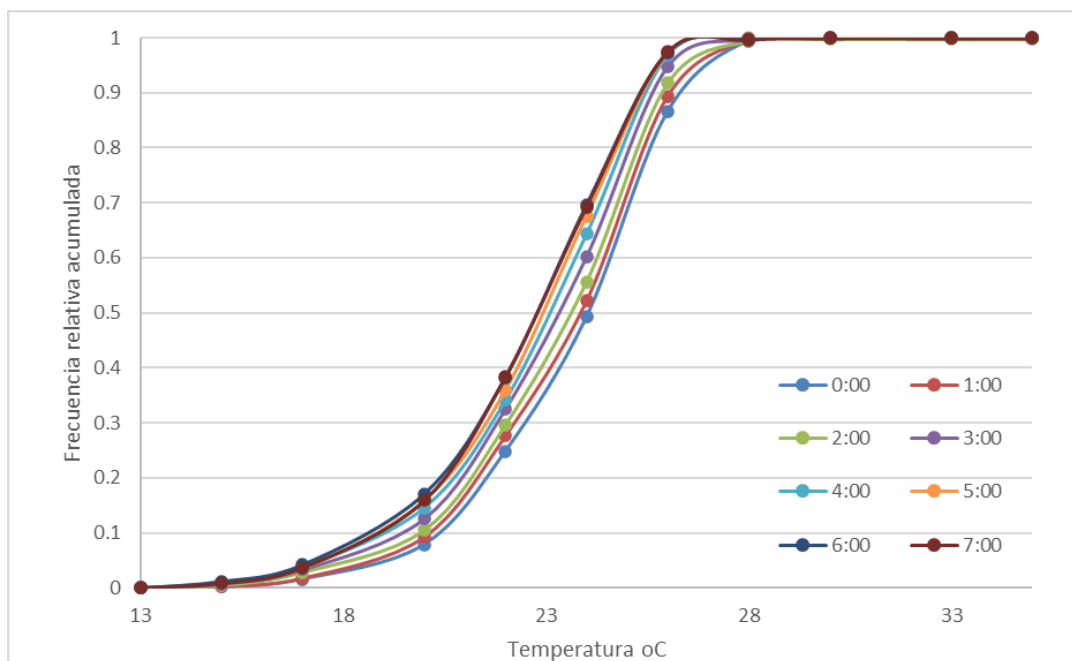


Figura B.1: Frecuencia relativa acumulada de la temperatura en Cienfuegos por horas. (Desde las 0:00 hasta las 07:00).

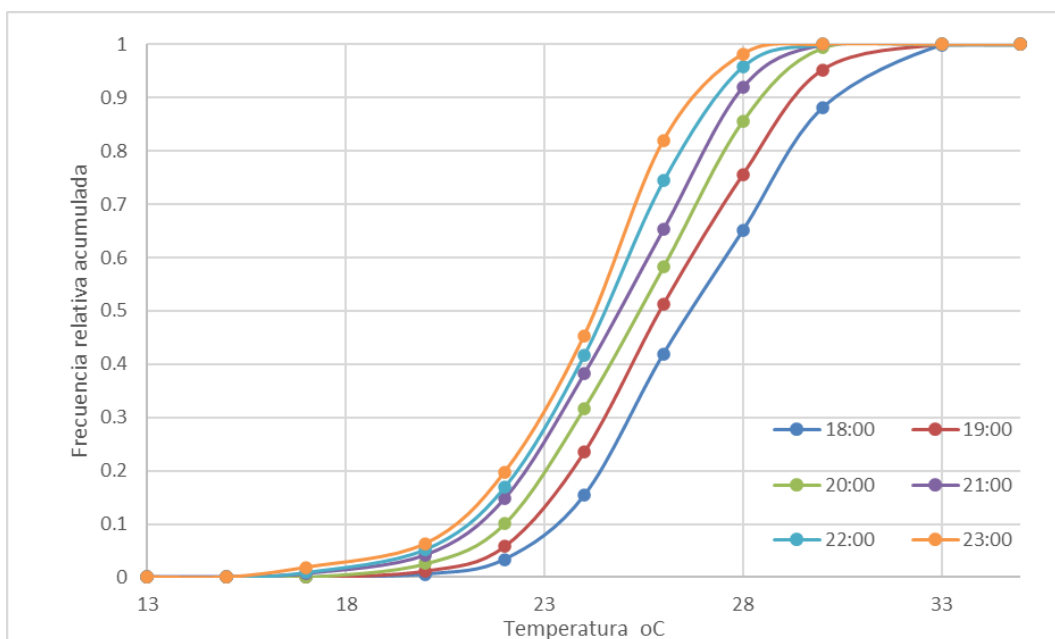


Figura B.2: Frecuencia relativa acumulada de la temperatura en Cienfuegos por horas. (Desde las 18:00 hasta las 23:00).

Anexo C.

Estudio del comportamiento de la temperatura ambiente en Cienfuegos en los meses de Mayo a Noviembre.

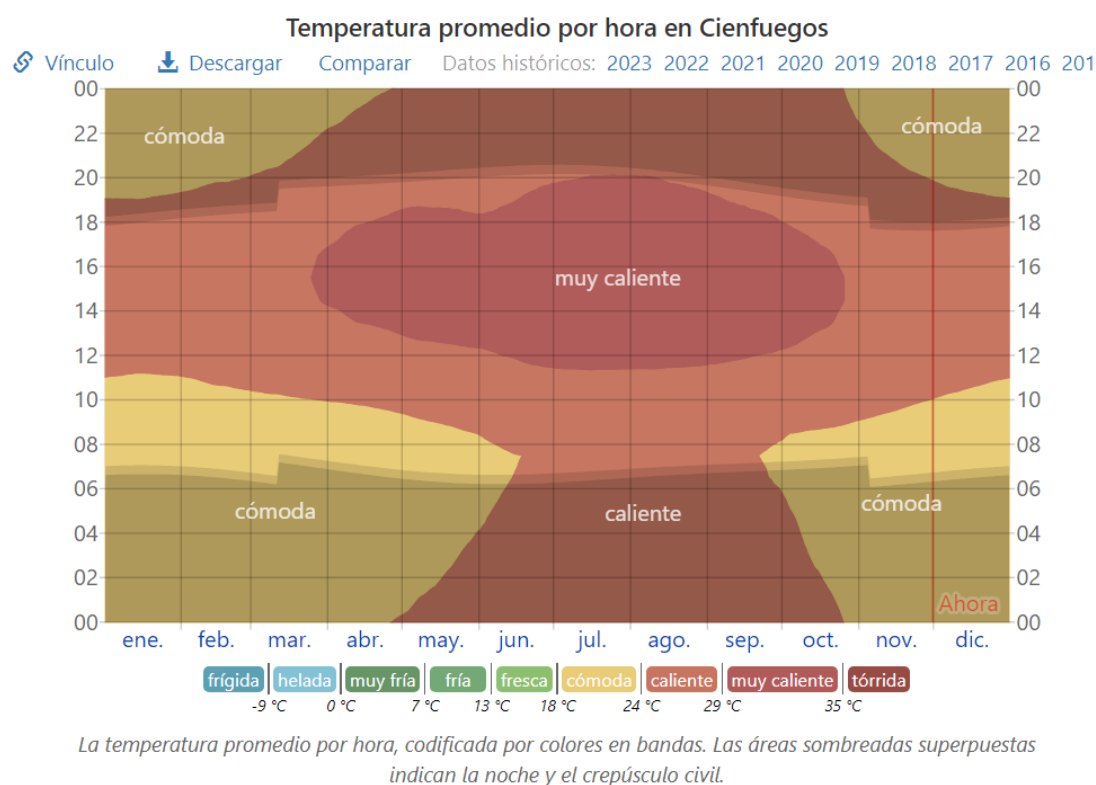


Figura C.1: Temperatura promedio por hora en Cienfuegos. (Weather spark, 2023)

Tabla C.1: Probabilidad de que la temperatura en Cienfuegos (%), durante el período de Mayo a Noviembre, alcance valores menores que 24,25 y 26 °C y lo que representa en días con esas temperaturas.

Hora	P(Ta<24)	P(Ta<25)	P(Ta<26)	Días T<24	Días T<25	Días T<26
0:00	28.6	54.2	77.0	53	100	142
1:00	31.8	57.8	81.5	59	106	150
2:00	34.6	62.9	86.2	64	116	159
3:00	38.6	66.6	91.2	71	123	168
4:00	42.6	72.8	94.3	78	134	174
5:00	45.5	79.3	94.9	84	146	175
6:00	49.2	85.8	95.2	91	158	175
7:00	50.0	86.6	95.6	92	159	176
8:00	27.8	55.5	82.4	51	102	152
9:00	11.7	21.4	37.5	22	39	69
10:00	3.5	9.3	18.6	6	17	34
11:00	0.8	3.3	9.5	2	6	18
12:00	0.3	1.5	4.9	1	3	9

13:00	0.1	1.5	4.6	0	3	8
14:00	0.3	1.9	5.4	1	4	10
15:00	1.0	3.3	7.5	2	6	14
16:00	2.4	5.9	13.8	4	11	25
17:00	4.5	10.1	20.2	8	19	37
18:00	7.9	18.9	29.0	15	35	53
19:00	12.9	27.0	37.6	24	50	69
20:00	19.7	34.2	45.5	36	63	84
21:00	23.3	39.6	53.3	43	73	98
22:00	25.4	46.4	63.4	47	85	117
23:00	27.4	49.8	70.5	50	92	130

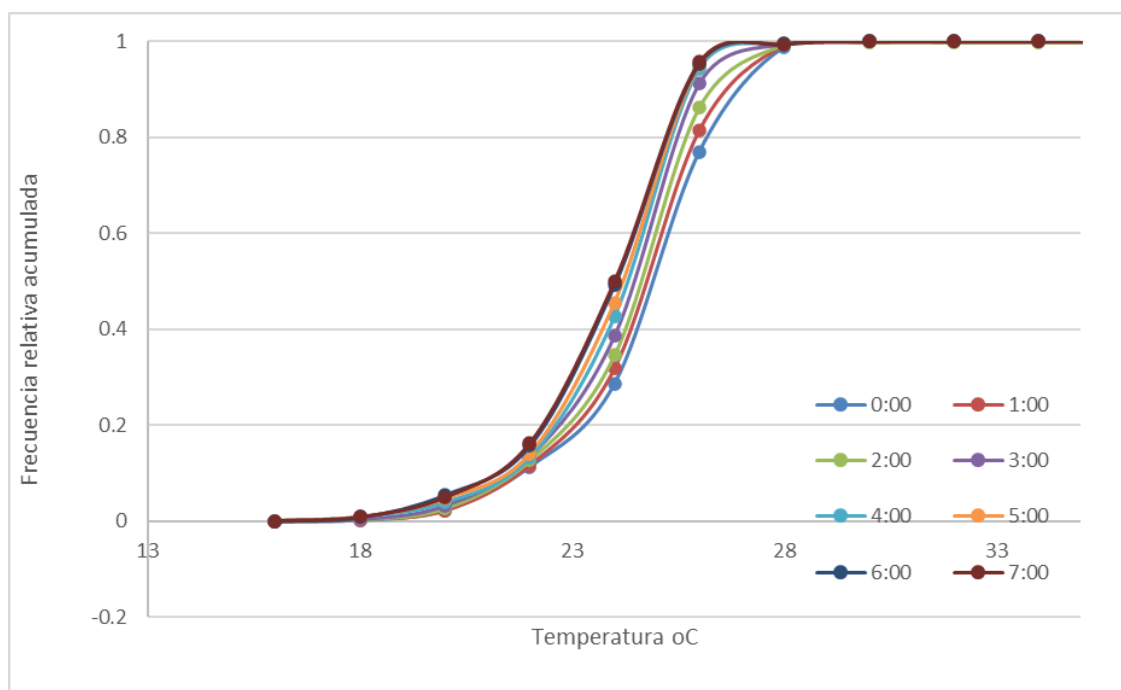


Figura C.2: Frecuencia relativa acumulada de la temperatura en Cienfuegos por horas. (Desde las 0:00 hasta las 07:00).

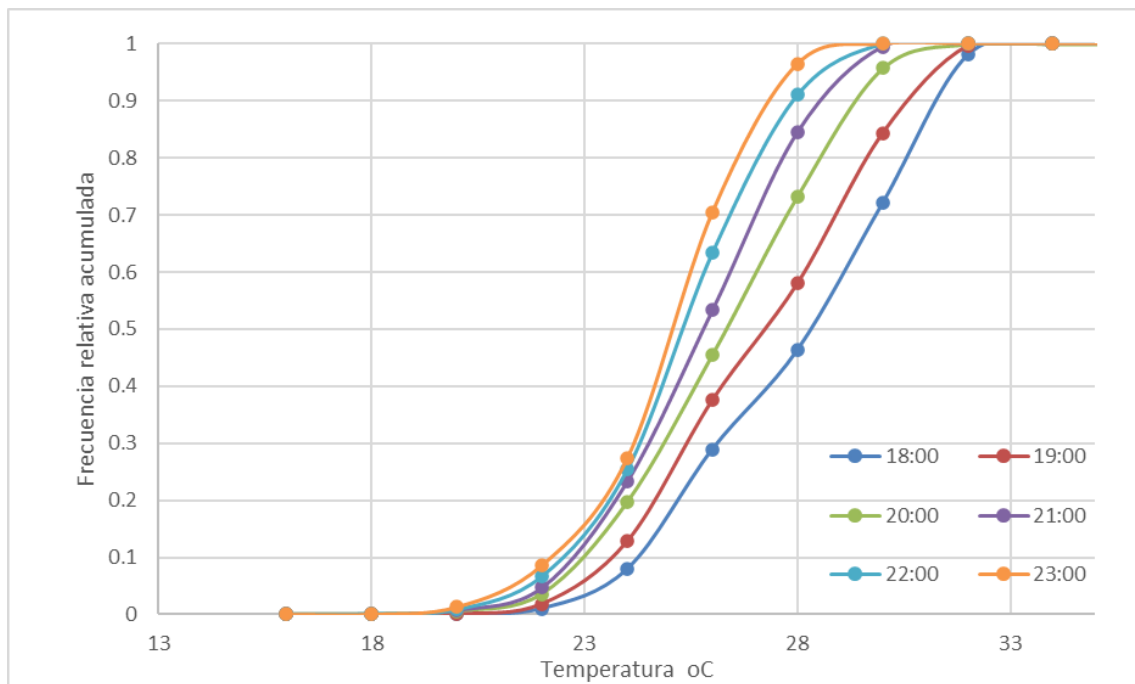
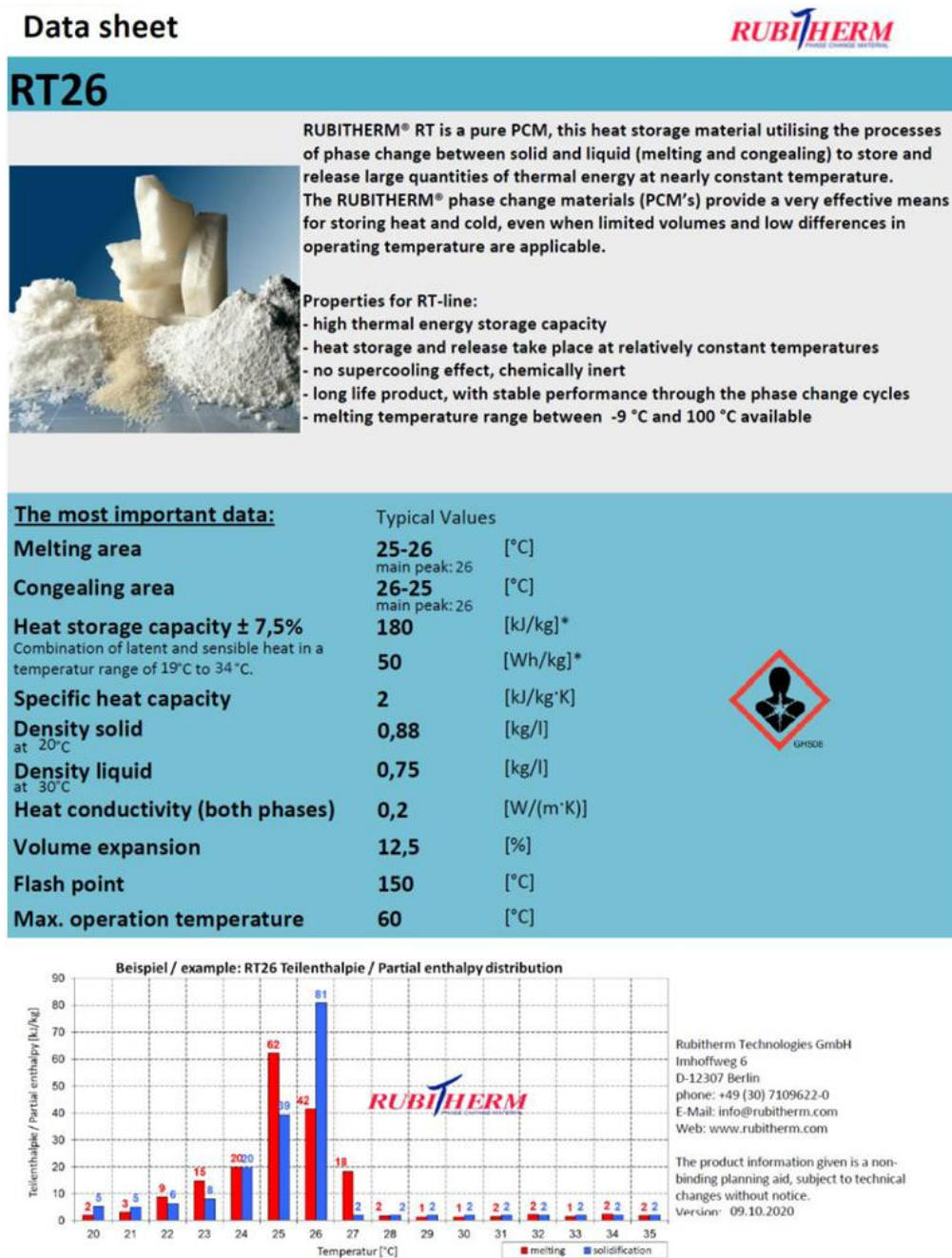


Figura C.3: Frecuencia relativa acumulada de la temperatura en Cienfuegos por horas. (Desde las 18:00 hasta las 23:00).

Anexo D.

Fig. D.1: Características del material de cambio de fase RT26. (Rubitherm, 2023)



*Measured with 3-layer-calorimeter.

Fig. D.2: Características del material de cambio de fase RT26E. (Rubitherm, 2023)

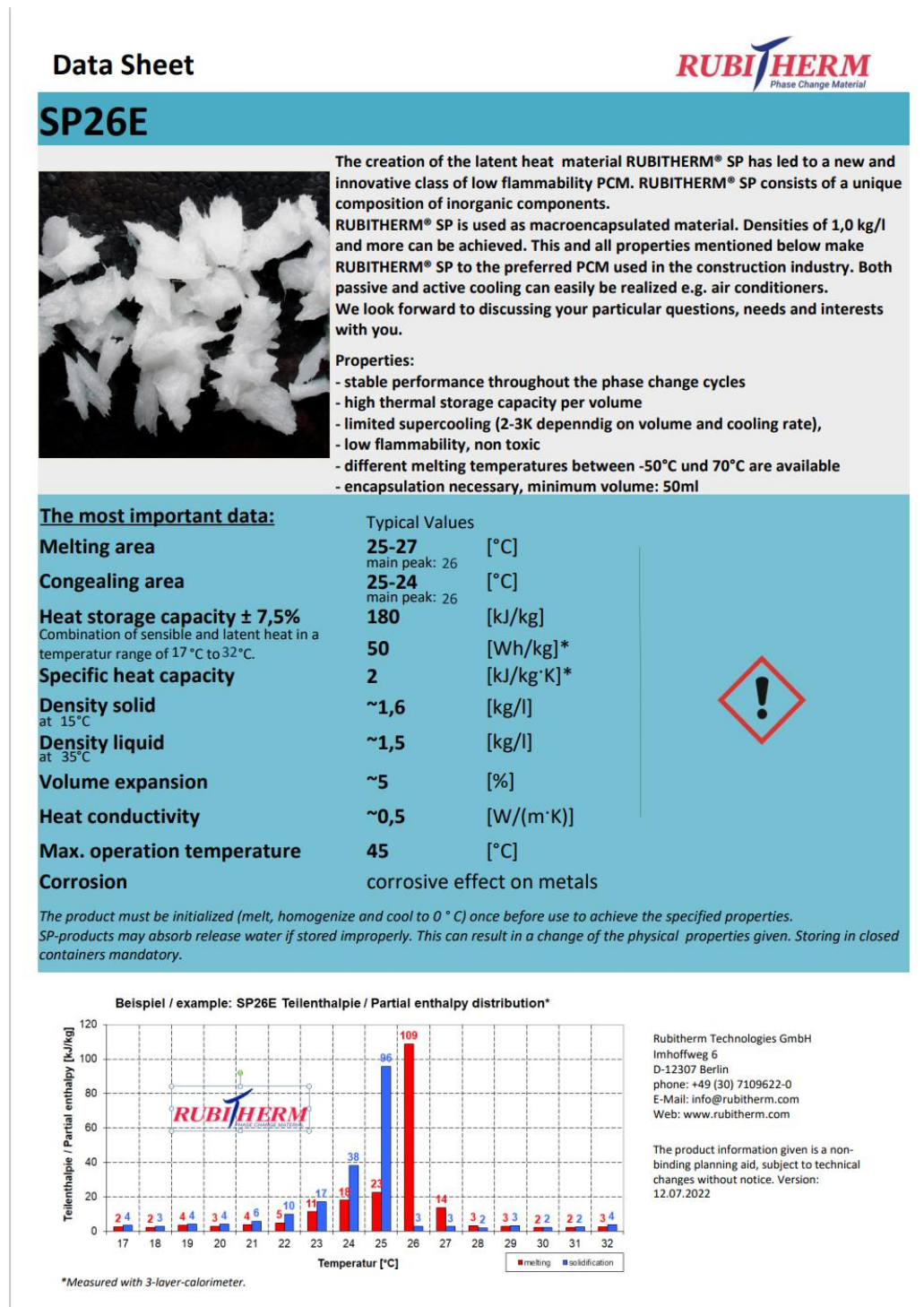


Figura D.4: Ventilador para Freecooling. (Maxgrowshop, s.f.)

TT160 Inline fan 552m³/h



Change fan to:


TT160 - 550m³/h I - speed

Producer: **VENTS**

Availability:

● The product is available in very large quantities

Shipment: on Monday [Check delivery time and costs](#)



[Add to wish list](#)

[Compare](#)

-

1

+

Add to basket

Model: TT160R1
Diameter: Ø160mm
Airflow: 550m³/h
Includes cable with euro plug
Distributor: AS System

Small and quiet fan, which is a good choice for those who need good ventilation to smaller rooms.

- for supply and extract ventilation
- low noise level
- motor with built-in overload protection
- high quality plastic housing
- for horizontal and vertical assembly

Technical data

Model:	TT160
Type:	I - Speed
Diameter:	160mm
Efficiency (m³/h):	405m³/h , 550m³/h
Power:	30W, 60W
Power consumption:	0,11A, 0,21A
Noise level:	33dB(A)/3m, 44dB(A)/3m
Maximum working temperature:	60°C
Weight:	2,65kg

Figura D.5. Sistema Freecooling y macroplacas.

PHASECUBE
PCM for ventilation

PhaseCube is an air-guided PCM storage developed by Rubitherm Technologies GmbH. It is based on the CSM plate, also developed by Rubitherm.

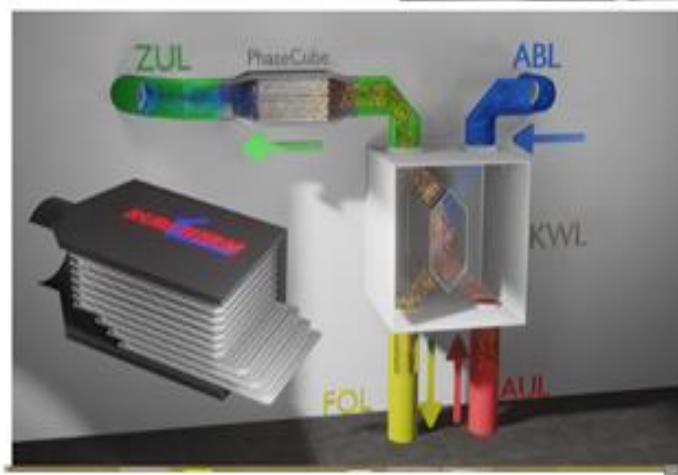


Tabla D.1: Presupuesto estimado para los sistemas descentralizados free cooling con macro cápsulas de PCM RT-26 (Rubitherm, 2023)

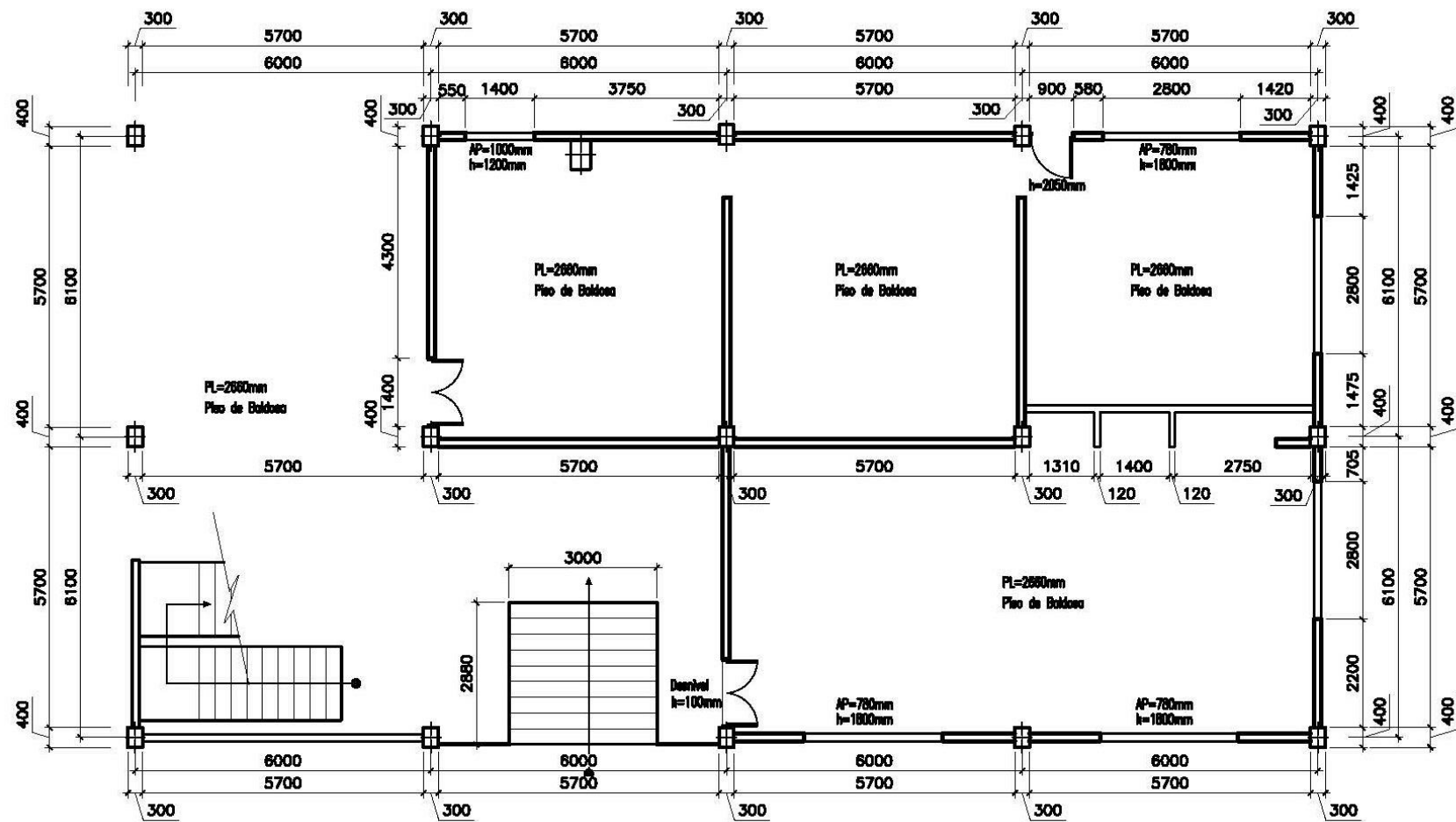
Descripción del ítem (19)	Especificaciones técnicas (20)	Cantidad	Valor Unitario	Valor estimado en el Proyecto (Euros)
Descentralizado Aire enfriado sistema con PCM macrocápsulas	Macro cápsulas CSM en cajas de aluminio con 2 kg de capacidad rellenas de orgánico Materiales PCM (materiales de cambio de fase), sin efecto de sobreenfriamiento, producto químicamente inerte, de larga duración, con rendimiento estable durante los ciclos de cambio de fase. Zona de fusión: 25-26 °C pico principal 26°C. Área de	200	12.55	3110

	congelación: 26-25°C pico principal 26 °C, capacidad de almacenamiento de calor $\pm 7,5$ % combinación de calor latente y sensible en rango de temperatura de 16 °C a 31 °C: 170-260 kJ/kg, (47-72)Wh/kg			
	Guiado por aire para 10 macro cápsulas con PCM para almacenamiento térmico, baja presión. pérdida 10 Pa, material Carcasa Polipropileno expandido (EPP), conexiones 160 mm	20	150.23	3000
	Ventilador para mover aire mediante	20	72.45	1449

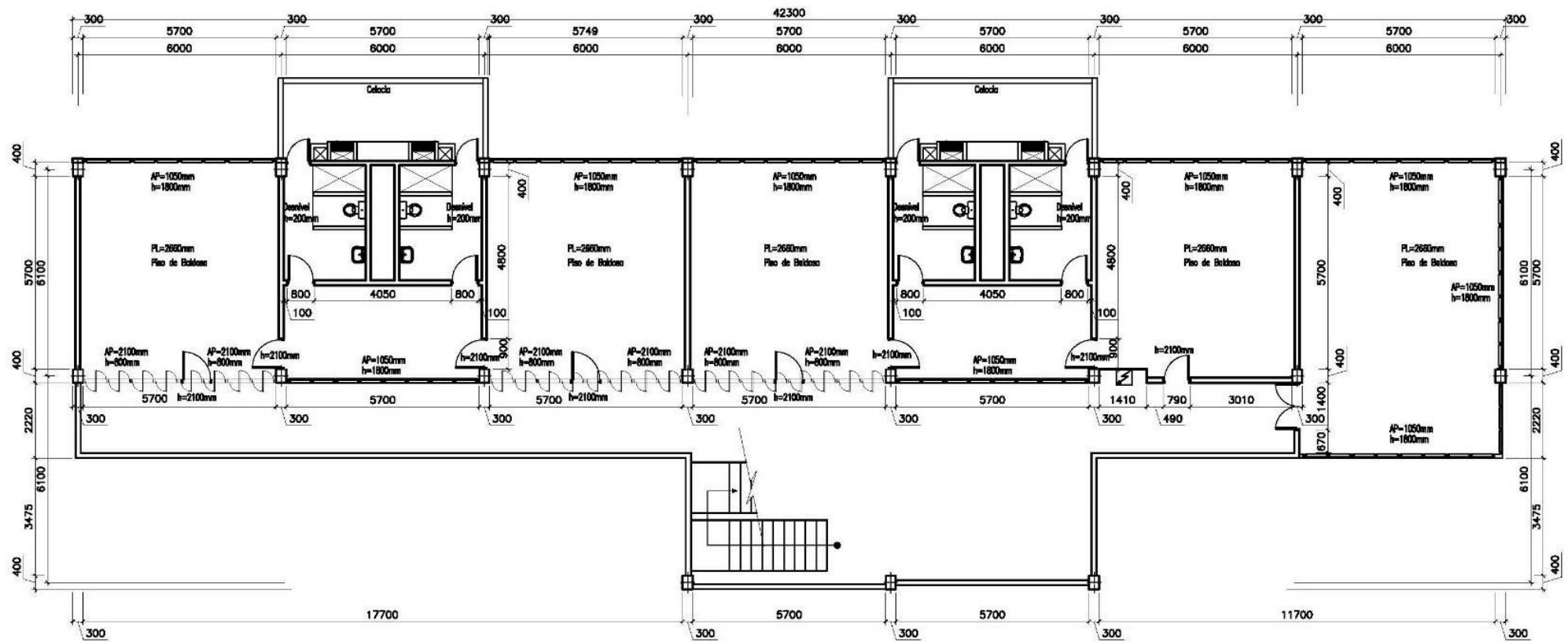
	conexión PCM 160mm 552m³/h con regulación			
	Subtotal			7563.6

ANEXO E

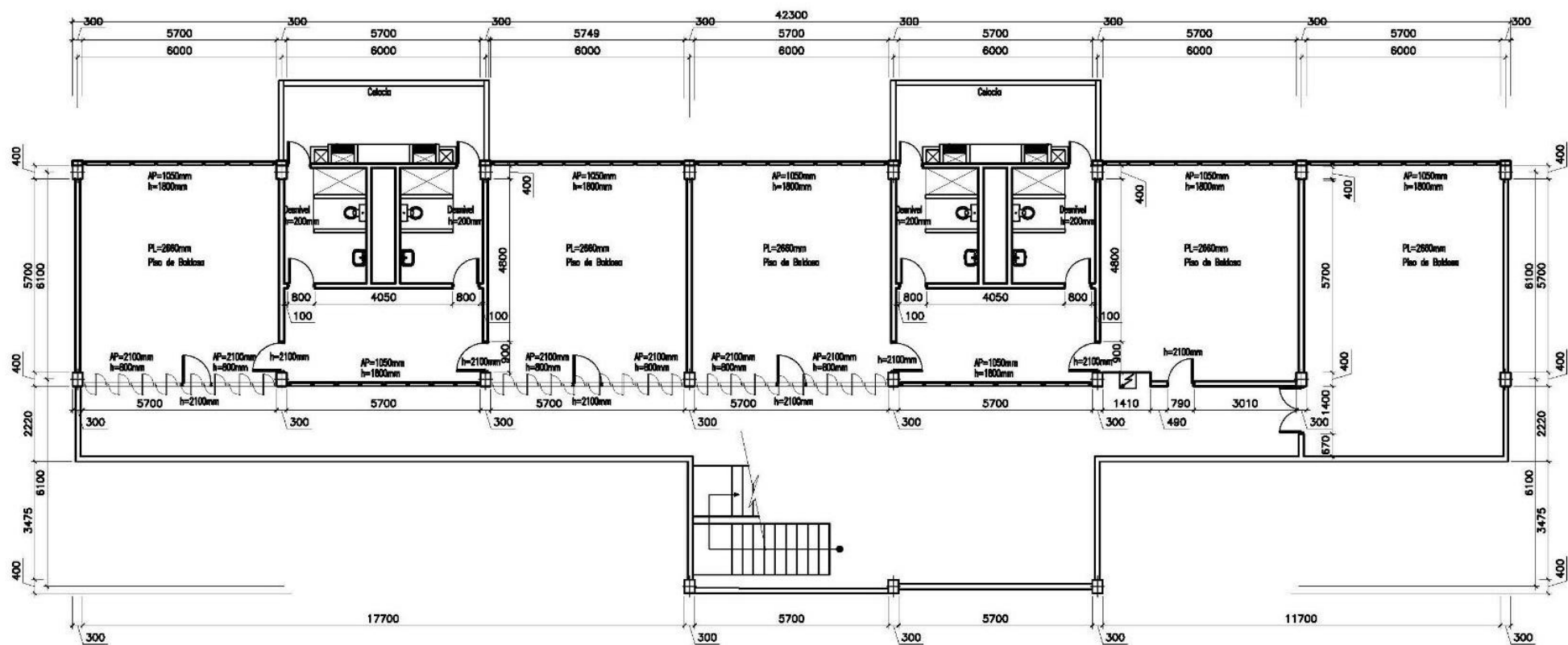
Fig. E.1 Planos del edificio



PLANTA 1ER. NIVEL



PLANTA 3ER. NIVEL



PLANTA 4to. NIVEL