



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**ALMACENAMIENTO DE FRÍO MEDIANTE MATERIALES DE CAMBIO DE
FASE (PCM) EN LA INSTALACIÓN DE CLIMATIZACIÓN DE UN EDIFICIO
ADMINISTRATIVO SINGULAR**

Autora:

Rosaura Sastre Zamora

Tutores:

Dr. Miguel Ángel Villamañán Olfos

**Catedrático de Máquinas y Motores
Térmicos.**

**Departamento Ingeniería Energética y
Fluidomecánica.**

Dr. Juan Carlos Herrera Merino

**Cuerpo Técnico - Escala Ingeniería
Cortes de Castilla y León**

Valladolid, julio 2019.

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'*

Dedicado a mi familia y amigos

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis dos tutores, el Dr. Miguel Ángel Villamañán, catedrático del Departamento de Ingeniería Energética y el Dr. Juan Carlos Herrero, ingeniero-jefe de la central energética del edificio de las Cortes de Castilla y León en Valladolid, que, a pesar de sus muchas otras obligaciones profesionales, han hipotecado su tiempo para proporcionarme explicaciones, orientación y solución a todos los problemas y dudas que me han ido surgiendo durante la elaboración de este trabajo. Sin su ayuda, no habría sido posible que lo llevara a término. También mi agradecimiento a los profesores Dr. Julio San José y Dr. Eloy Velasco por su interés en este trabajo y su disponibilidad para proporcionarme contactos con empresas activas en este sector de los sistemas de refrigeración, fundamentalmente con Carrier España.

Así mismo he contado con la colaboración desinteresada de Carrier España que a través de su director técnico de climatización, D. Enrique Gómez Pascual me puso en contacto con D^a. Paola García, ingeniera de prescripción de la zona norte, que amablemente me ha proporcionado información y presupuesto de la instalación de almacenamiento de frío que ha desarrollado Carrier United Technologies.

Por último, también quiero destacar todo el apoyo que he recibido de mi familia y amigos, los cuales han estado pendientes del desarrollo de este trabajo hasta el final. Muchas gracias.

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla una propuesta de acumulación de frío en periodo nocturno en el contexto de la instalación de climatización de la sede de las Cortes de Castilla y León en Valladolid. Se trata de acoplar en el circuito de agua de refrigeración un depósito de almacenamiento de energía térmica mediante tecnología de materiales de cambio de fase (PCM). Este reservará el frío producido por la enfriadora durante el periodo nocturno hasta su utilización en horario laboral.

La propuesta de este sistema busca el ahorro económico en materia de climatización y el uso sostenible de la energía eléctrica necesaria para la producción de agua de refrigeración mediante su empleo en las horas de mínima demanda (horas nocturnas).

Palabras clave: Materiales de cambio de fase, Acumulación de frío, Depósito de PCM, Demanda eléctrica, Ahorro económico.

ABSTRACT

The present study develops a proposal of cold storage during the night period in the context of the air conditioning installation of the parliament, Las Cortes de Castilla y León in Valladolid.

Low temperature thermal energy storage using Phase Change Materials (PCM) is proposed to be added to the existing air conditioning system. The purpose aims for electricity cost savings by using low-fare night hours in the production of cold, being accumulated in PCM and used in daily hours in the air conditioning

Key words: Phase Change Materials, Thermal energy storage, PCM tank, Electric demand, Economic savings.

ÍNDICE

RESUMEN.....	9
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS. PLANTEAMIENTO DE ALMACENAMIENTO DE FRÍO MEDIANTE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE (PCM) EN LA INSTALACIÓN DE CLIMATIZACIÓN DE UN EDIFICIO ADMINISTRATIVO SINGULAR.....	17
1.1. Descripción del edificio	17
1.2. Necesidad de climatización del edificio.....	18
1.3. Descripción del sistema de refrigeración actual	20
1.3.1. Elementos del sistema de producción de frío	21
1.3.2. Sistema de distribución del frío.....	22
1.3.3. Elementos de conexión	24
1.4. Objetivo del trabajo: ahorro económico por medio de la acumulación de frío nocturna en materiales de cambio de fase (PCM).....	26
1.4.1. Circuito de refrigeración.....	28
2. SITUACIÓN DE LA DEMANDA ELÉCTRICA GLOBAL EN ESPAÑA Y ESTRATEGIAS PARA UN MEJOR APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE ..	33
2.1. La demanda eléctrica.....	33
2.1.1. Demanda eléctrica en invierno.....	34
2.1.2. Demanda eléctrica en verano.....	35
2.1.1. Medidas para un uso sostenible de la energía: iniciativas de gestión de la demanda.....	37
2.1.2. Iniciativa de desplazamiento del consumo de las horas punta a las horas valle: producción de frío en horario nocturno	40
3. PANORÁMICA DE LOS MATERIALES DE CAMBIO DE FASE (PHASE CHANGE MATERIALS, PCM).....	45
3.1. Introducción	45
3.2. Tipos de materiales de cambio de fase según su composición ..	46
3.2.1. Materiales orgánicos.....	47
3.2.2. Materiales inorgánicos.....	49
3.2.3. Eutécticos.....	52

3.3. Métodos de encapsulación	53
3.3.1. Método Bulk storage	53
3.3.2. Método de macroencapsulación	53
3.3.3. Método de microencapsulación	54
3.4. Criterio de selección del PCM	55
3.4.1. Propiedades deseables en un PCM para almacenamiento de energía térmica	55
4. FUNDAMENTOS TERMOENERGÉTICOS DE LA PRODUCCIÓN DE FRÍO.....	59
4.1. La producción de frío y el enunciado de Clausius del Segundo Principio.....	59
4.2. La producción de frío ideal con una máquina frigorífica de Carnot.....	60
4.3. Parámetros energéticos de una máquina frigorífica cualquiera	62
4.3.1. Coeficiente de rendimiento (COP)	62
4.3.2. Rendimiento exergético (ψ)	62
4.4. Ciclos de refrigeración de las enfriadoras de la instalación de estudio.....	63
4.4.1. Máquina frigorífica de compresión de vapor	63
4.4.2. Sistemas de enfriamiento	67
5. ESTUDIO JUSTIFICATIVO DEL AHORRO ECONÓMICO DE ACUMULACIÓN DE FRÍO MEDIANTE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE.....	75
5.1. Supuesto 1: ahorro económico anual con un depósito de PCM y demanda de frío máxima y constante	76
5.1.1. Paso 1.1: definir el depósito de PCM y la bomba necesaria.....	76
5.1.2. Paso 1.2: cálculo de las potencias eléctricas consumidas y de su coste económico en producción de frío nocturna con un depósito de PCM y demanda de frío máxima y constante.....	79
5.1.3. Paso 1.3: cálculo del coste económico en producción de frío diurna sin depósito de PCM y con demanda de frío máxima y constante	86

5.1.4.	Paso 1.4: cálculo del ahorro económico y amortización del sistema de almacenamiento de frío con una demanda máxima y constante.....	91
5.2.	Supuesto 2: ahorro económico mensual con un depósito de PCM y demanda de refrigeración variable (en función del horario) ...	94
5.1.1.	Paso 1.2: definición y simplificación de la demanda real de un día de verano	94
5.2.1.	Paso 2.1: definir el depósito de PCM para una demanda variable.....	95
5.2.2.	Paso 2.2: cálculo de las potencias eléctricas consumidas y de su coste económico en producción de frío nocturna con un depósito de PCM y demanda variable.....	97
5.2.3.	Paso 2.3: cálculo de las potencias eléctricas consumidas y de su coste económico en producción de frío diurna sin un depósito de PCM y demanda variable.....	99
5.2.4.	Paso 2.4: cálculo del ahorro económico con una demanda variable y comparativa con el de una demanda constante. Amortización del depósito de PCM	101
6.	CONCLUSIONES	105
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	109

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS. PLANTEAMIENTO DE ALMACENAMIENTO DE FRÍO MEDIANTE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE (PCM) EN LA INSTALACIÓN DE CLIMATIZACIÓN DE UN EDIFICIO ADMINISTRATIVO SINGULAR

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS. PLANTEAMIENTO DE ALMACENAMIENTO DE FRÍO MEDIANTE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE (PCM) EN LA INSTALACIÓN DE CLIMATIZACIÓN DE UN EDIFICIO ADMINISTRATIVO SINGULAR

1.1. Descripción del edificio

El contexto espacial concreto en que se desarrolla este proyecto es la sede de las Cortes de Castilla y León, av. de Salamanca, s/n, 47014, Valladolid (coordenadas: 41°38'35"N 4°44'42"O). Debido a la naturaleza del proyecto (climatización), conviene hablar de la climatología de la zona de Valladolid. Esta está definida como de tipo mediterráneo continental. Este es un clima mediterráneo, pero con temperaturas más extremas tanto en invierno como en verano [A1]. Esta diferencia con el clima mediterráneo puro se ve reflejada en la media de temperaturas mínimas en enero: 0,2 °C y la media de temperaturas máximas en el mes de julio: 29,4 °C [B1]

En la sede de las Cortes de Castilla y León se localiza la asamblea legislativa regional de la comunidad autónoma con el mismo nombre. Este edificio fue inaugurado en el año 2007 y su diseño es obra del arquitecto Ramón Fernández Alonso. La superficie construida del edificio es de 35 200 m², de los cuales 22 415 m² es área climatizada. La geometría del edificio está constituida por 4 volúmenes [42] [12] (ver fig. 1.1).



Figura 1.1 (Sede de las Cortes de Castilla y León: arriba, fachada oeste del edificio; abajo, fachada este)

Los números de la figura 1.1 indican los diferentes volúmenes del edificio.

- Primer volumen (1): es el más extenso que consiste en un basamento de planta rectangular de hormigón blanco de 175 m de largo por 49,5 m de ancho. Este gran volumen se encuentra interrumpido en su fachada este por una cristalera que permite el paso de luz natural (situada debajo del volumen del Hemiciclo). La fachada oeste se encuentra completamente abierta con una celosía.
- Segundo volumen (2): corresponde con la biblioteca y se encuentra integrada en el primer volumen mencionado. Esta está orientada hacia la Avenida de Salamanca, y se distingue por las franjas horizontales de aluminio y vidrio.
- Tercer volumen (3): correspondiente al Hemiciclo, de planta 27,8 m por 28 m y de altura 13,30. Este espacio se encuentra situado sobre el primer volumen y contrasta con el hormigón blanco por el vidrio serigrafiado utilizando imágenes digitales de alabastro.
- Cuarto volumen (4): Se encuentra situado encima de la celosía de la fachada oeste descrita anteriormente. Es un volumen de vidrio que abarca dos pisos y cuyas dimensiones son de 150 m de ancho por 10 m de altura.

1.2. Necesidad de climatización del edificio

La programación de la climatización de las diferentes partes del edificio depende del tipo de uso que se dé a cada sala, el horario en que sea utilizada y la climatología exterior. Se pueden definir horarios diferentes para la climatización de cada planta, ya que existen fancoils individuales en estas. Esto quiere decir que los circuitos de cada planta (desde la planta baja hasta la 4.^a planta) son independientes. También resulta independiente la climatización de cada una de las salas señaladas en la tabla 1.1 [12].

Denominación Climatizador	Sala
1,1	Despacho pl 1ª
1,2	Sala de juntas
2	Aire primario pl2
3	Biblioteca
4	Despacho m5 pl2
5	Sala Cortes de León
6	Sala ponencias
7	Sala Castillo Fuensaldaña
8	Sala Junta portavoces
9	Sala Campos Castilla
10	Depósito sótano
11	Salón de actos
12	Sala polivalente
13	Comedores
14,1	Almacén pl 2
14,2	Despacho Presidente
15	Salón Recepciones
16	Cafetería
17	Aula
18	Ludoteca
19	Aire primario 1
20	Aire primario 2
21	Vestíbulo
22	Vestíbulo recepción
23	Hemiciclo
24	Vestíbulo Hemiciclo
25	Vestíbulo Hemiciclo pl2

Tabla 1.1([12] pág. 63)

Para la correcta climatización de cada una de las zonas señaladas, se procede a revisar diariamente el calendario de actividades, teniendo en cuenta el uso de cada sala, el horario y las posibles necesidades especiales que pueda haber.

El edificio puede tener un horario de ocupación muy amplio. De manera ordinaria, el tiempo de ocupación se extiende de las 8:00 hasta las 16:00, aunque en días de eventos políticos esta se puede extender hasta las 21:00. La ocupación puede variar desde 150 a 350 personas. A continuación, la tabla 1.2 con los horarios del sistema de climatización y el consumo medio diario de gas para la calefacción dependiendo ambos de la época del año [11] [12]:

ÉPOCA	HORARIO	CONSUMO DIARIO GAS CALEFFACIÓN [m ³]
INVIERNO	4:00h - 20:00h	800-1200
PRIMAVERA	6:30h - 18:00h	500-700
VERANO	9:00h - 20:00h	0
OTOÑO	7:00h - 18:00h	300-600

Tabla 1.2 ([12] pág. 63]

1.3. Descripción del sistema de refrigeración actual

Dado que el contexto en el que se desarrolla este trabajo es el sistema de refrigeración de este edificio, se procede seguidamente a su descripción. La figura 1.2 muestra el esquema de esta, el cual se describirá a continuación.

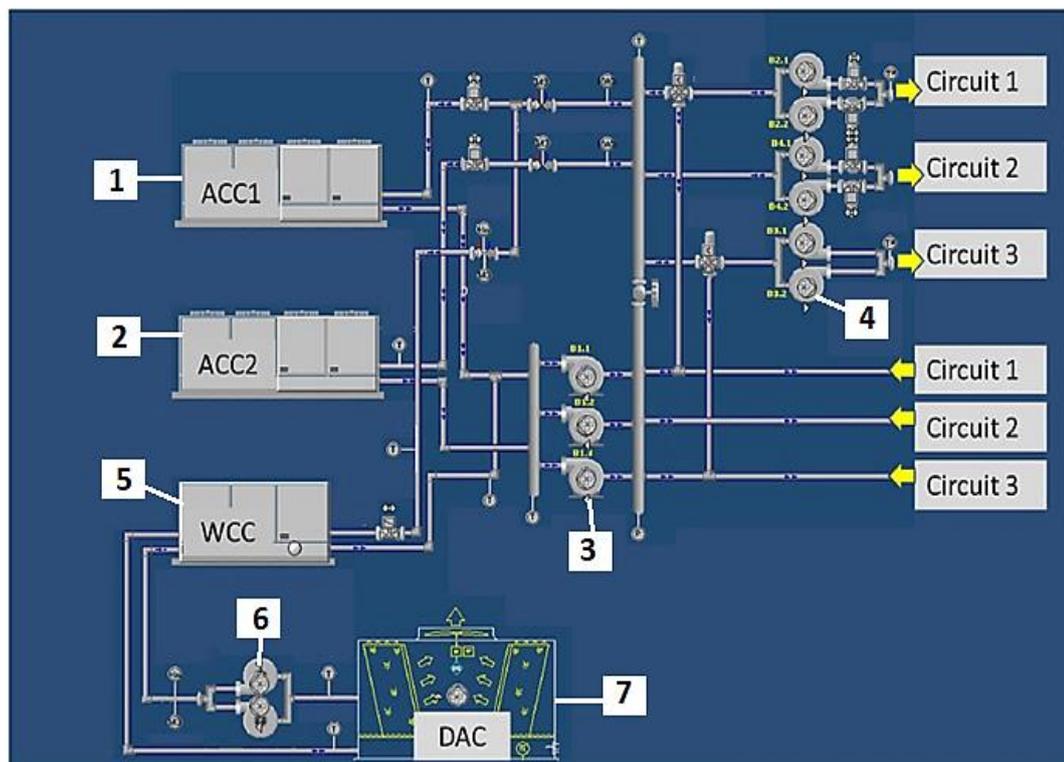


Figura 1.2 (Esquema del sistema de producción de frío: 1 y 2 enfriadoras condensadas por aire. 3 bombas de primario. 4 bombas de impulsión a circuitos. 5 enfriadora condensada por agua. 6 las bombas de recirculación de secundario. y 7 el enfriador adiabático. [11])

1.3.1. Elementos del sistema de producción de frío

Los elementos que lo componen son (ver figura 1.2):

- 2 enfriadoras condensadas por aire de marca McQuay y modelo ALS E XE 229.2 (1 y 2).
- 1 enfriadora condensada por agua de marca Carrier y modelo 30 XW-P0862 (5).
- 1 enfriador adiabático de marca Baltimore y modelo DFCV S9124 M613 (7).

Tanto las enfriadoras condensadas por aire (1 y 2) como la enfriadora condensada por agua (5) se basan en el sistema de refrigeración de compresión de vapor, cuyo funcionamiento se explica detalladamente en el apartado x de este trabajo. El enfriador adiabático (7) tiene como objetivo disipar el calor transferido al agua en el condensador por parte del líquido refrigerante. Este procedimiento se explica en el apartado x de este trabajo [12].

Tal y como se observa en la figura 1.2, una de las enfriadoras condensadas por aire se encuentra en paralelo con la enfriadora condensada por agua, y, a su vez, estas se encuentran en paralelo con la segunda enfriadora por aire. Con esta configuración se busca cubrir las posibles averías que puedan surgir en cualquiera de estos elementos.

Las enfriadoras (1, 2 y 3) son las encargadas de la generación del agua fría a una temperatura de 7 °C. Después, esta es propulsada mediante las bombas de impulsión a circuitos (4) hasta los elementos terminales (fancoils y climatizadores). En esta parte del circuito, se produce un intercambio en el que el agua enfría el aire que finalmente es expulsado a la zona que se desea refrigerar. El agua regresa finalmente a las enfriadoras, impulsada por las bombas del circuito primario, a una temperatura de 12 °C para comenzar de nuevo el proceso de refrigeración.

En cuanto al funcionamiento de las enfriadoras, el modo de operación normal es el de la enfriadora condensada por agua (5) trabajando en solitario, ya que esta es más eficiente que las condensadas por aire (1 y 2). Para momentos puntuales donde se produce un pico en la demanda, a esta primera se le suma la acción de una enfriadora condensada por aire (2). Para las ocasiones donde esté fuera de servicio la enfriadora condensada por agua, esta podrá ser reemplazada por cualquiera de las otras dos condensadas por aire [11].

1.3.2. Sistema de distribución del frío

Existen 3 circuitos principales por los cuales es impulsada el agua de refrigeración (ver figura 1.2):

1. Fancoils de la planta baja y primera planta.
2. Fancoils de la planta tercer y cuarta planta.
3. Climatizadores de todas las plantas.

1) Elementos terminales

Estos son los elementos del circuito encargados de realizar el intercambio aire agua y propulsar el aire refrigerado a las diferentes estancias. Además, realizan un control de la temperatura y, en el caso de los climatizadores, también de la humedad relativa.

a. Fancoils

Estos elementos terminales están localizados en los despachos del edificio y su esquema está representado en la figura 1.3. Estos equipos poseen unos serpentines interiores por donde circula el agua recibida (puede ser caliente o fría). Un ventilador es el encargado de impulsar el aire, estando este en contacto con el exterior de los serpentines mencionados. En este momento se produce el intercambio térmico agua-aire. Tras adquirir la temperatura deseada, el aire es pasado por un filtro y es expulsado a la estancia deseada. Hay una toma de aire interior y otra toma de aire exterior tratado previamente por los climatizadores del circuito primario.

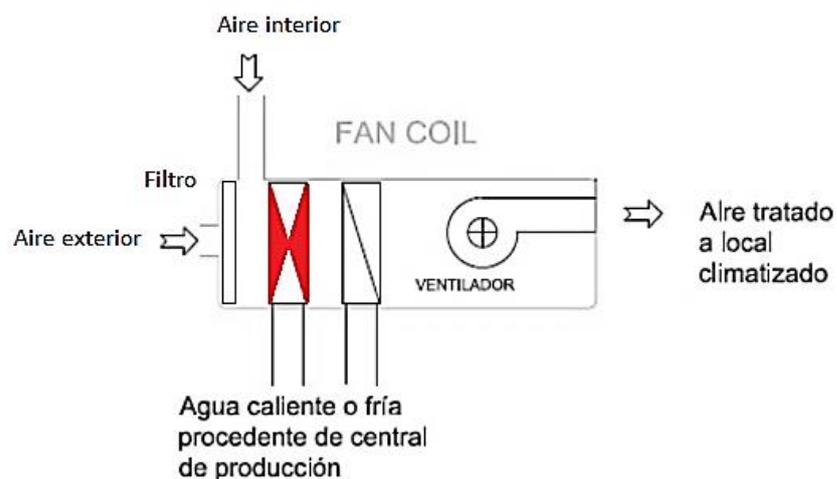


Figura 1.3

Los fancoils toman datos de la temperatura de la sala mediante sondas de temperatura, de tal manera que, regulando las características de los flujos de aire, se pueda conseguir una temperatura constante en la zona que se desea climatizar.

En el edificio de las Cortes de Castilla y León dispone de 226 fancoils entre los que hay 4 modelos de baja silueta y 5 modelos de gran potencia [12].

b. Climatizadores

Este equipo está basado en el mismo sistema que el fancoil, pero usa mayores caudales de aire y la posibilidad de modificar las condiciones de la zona climatizada es mayor, ya que, además de controlar la temperatura del aire, puede humectarlo o deshumectarlo [12].

Seguidamente se presenta la tabla 1.3 con los elementos de un climatizador

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
C	Sección de toma de aire con compuerta de regulación motorizada, velocidad máxima de paso de aire 6 m/s.
G-4	Sección de filtros con una eficacia 90%.
F-7	Sección de filtros con una eficacia 80-90%.
R	Sección de batería de recuperación de calor.
(+)	Sección de batería de precalentamiento.
H	Sección para humidificación.
(-)	Sección batería enfriamiento.
(+)	Batería de postcalentamiento.
V	Sección de ventilación.
S	Silenciador.
F-9	Filtros.

Tabla 1.3 ([12] pág. 71]

Y esquemáticamente, la configuración del climatizador se puede observar a continuación, en la figura 1.4:

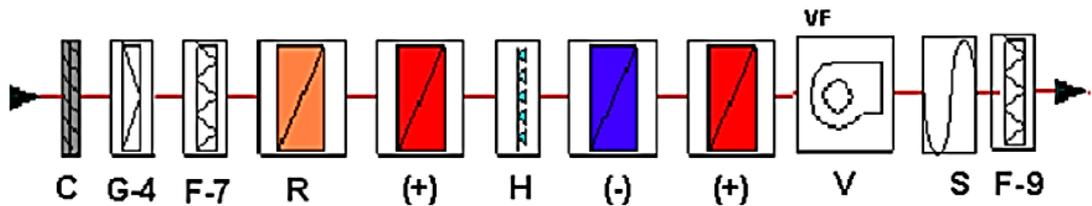


Figura 1.4 [12]

En el edificio se encuentran un total de 27 climatizadores repartidos por las diferentes plantas.

1.3.3. Elementos de conexión

En este apartado se realiza una descripción de los elementos que sirven para impulsión, regulación y control del agua de refrigeración, esto es, elementos de valvulería o conexionado como bombas, tuberías, válvulas y manguitos [12].

1) Bombas

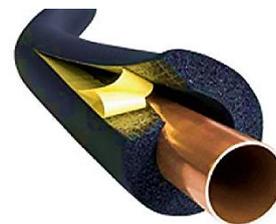
En el caso concreto de esta instalación se han usado bombas de rotor seco. En este tipo de bombas, los elementos que entran en contacto con el fluido están separados del motor. Este se une a la bomba por medio de un acoplamiento y su refrigeración se realiza por aire [38].



Figura 1.5 (bomba de rotor seco [38])

2) Tuberías

Son los elementos por donde se transporta el agua de refrigeración a los diferentes elementos de la instalación. En este caso, estas están fabricadas en acero negro y el aislamiento es espuma elastomérica.

Figura 1.6 (Tubería de acero negro con aislamiento. Fuente: <https://isover.es/>)

3) Válvulas

Dependiendo de la función que realicen, se pueden encontrar en la instalación 3 tipos de válvulas: válvula de corte, válvula anti-retorno y válvula de equilibrio dinámico:

a. Válvulas de corte



Figura 1.7 (válvula de corte. Fuente: www.valvulasarco.com)

Estos elementos que impiden el paso del agua por ciertas partes de la instalación, lo que permite el aislamiento de los circuitos y derivados en caso de avería.

b. Válvulas anti-retorno

Son aquellas que impiden el paso del fluido en un sentido, pero lo permiten en el sentido contrario, consiguiendo así evitar reflujos en la instalación.



Figura 1.8 (válvula anti-retorno. Fuente: www.genebre.es)

c. Válvula de equilibrio dinámico



Figura 1.9 (Válvula de equilibrio dinámico. Fuente: disper.com)

Están situadas en las derivaciones del circuito y en las entradas de los elementos terminales. Mediante la medida de presión determina el caudal y ajusta este a las necesidades de climatización.

4) Filtros



Figura 1.10 (Filtro en “Y” [disper.com])

Agua arriba de los elementos donde se pueden ocasionar atascos debidos a las partículas que pueda contener el fluido, se sitúa un filtro en “Y” como el que se muestra en la figura 1.10. En su interior hay un tamiz a través del cual circula el agua y retiene los elementos en suspensión de diámetro mayor que los agujeros de este.

5) Manguitos antivibratorios

Estos manguitos se encargan de absorber la vibración de los elementos móviles como bombas o climatizadores. Se sitúan en la unión de estos con las tuberías de la instalación, para evitar que la vibración se transmita a otros elementos.



Figura 1.11 (manguito antivibratorio [genebre.es])

1.4. Objetivo del trabajo: ahorro económico por medio de la acumulación de frío nocturna en materiales de cambio de fase (PCM)

Una vez descrito el contexto espacial de este trabajo, se procede a introducir el objeto principal del mismo: propuesta de acumulación de frío mediante materiales de cambio de fase (PCM) que proporcionará un ahorro económico en materia de refrigeración.

Este objetivo se pretende lograr mediante el acoplamiento de un depósito de materiales de cambio de fase en la instalación de refrigeración. Con esta tecnología de almacenamiento térmico, es posible desligar las horas de producción del agua fría para la climatización del edificio de las horas de utilización del aire acondicionado.

El sistema de producción de frío (enfriadora condensada por agua, enfriador adiabático y las bombas asociadas) requiere de electricidad para funcionar. Se debe tener en cuenta que al estar efectuándose un consumo en media tensión en este edificio, se tiene asociada una tarifa eléctrica de discriminación horaria. Esto es, que el precio de los kWh eléctricos utilizados depende del horario en que estos son consumidos. Así pues, cuando la demanda eléctrica es menor, la electricidad será más barata (horas valle) y lo contrario ocurre cuando la demanda es mayor (horas pico). Este tema se tratará más en detalle en el capítulo 2: “Panorámica de la demanda eléctrica global en España y estrategias de su aprovechamiento”

Generalmente, las horas valle están asociadas a las horas nocturnas y las horas pico a las horas centrales del día. Basándose en lo explicado anteriormente, se busca la utilización de la enfriadora para producir agua fría durante la noche, almacenar ese frío en el depósito de materiales de cambio de fase y emplearlo durante el día, en las horas pico. De esta manera, se producen los mismos kW de frío a menor coste.

La figura 1.12 es significativa en este aspecto. En ella se contemplan los histogramas de las dos situaciones mencionadas. En el de la izquierda se presenta la situación sin almacenamiento de energía (sin Thermal Energy Storage- TES) A lo largo de una jornada laboral. En cambio, el histograma derecho muestra el ahorro eléctrico al redistribuir el pico energético (representado en color verde) en funcionamiento nocturno (representado en color gris) gracias a la tecnología de TES.

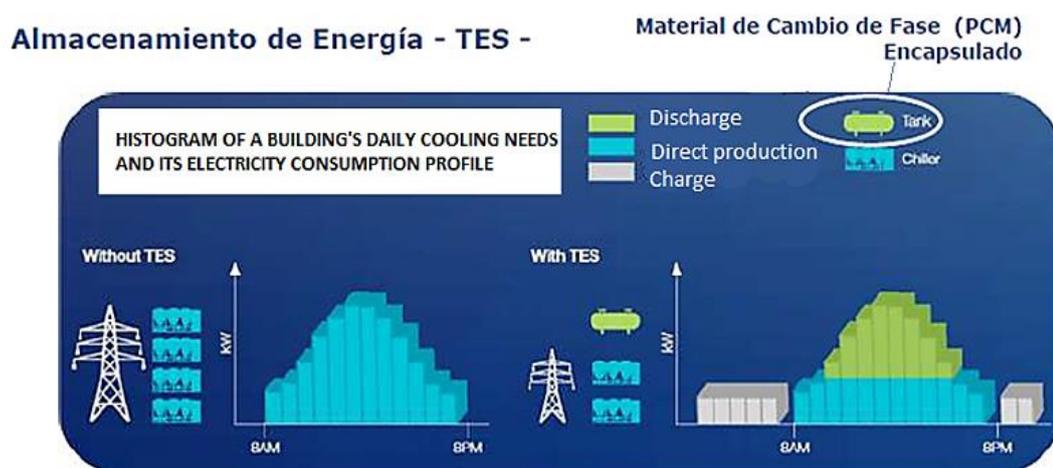


Figura 1.12 (Histograma de la necesidad diaria de frío de un edificio y su perfil de consumo eléctrico ([3] pág. 68)

La tecnología empleada para almacenar este frío es la de los materiales de cambio de fase (PCM, Phase Change Materials), la cual se explicará con detalle en el capítulo 3. Estos se encontrarán en el interior del tanque o depósito, el

cual será recorrido por tuberías que transporten el agua fría dando lugar al intercambio térmico deseado.

Para la implantación del sistema sería necesaria la elección de un material de cambio de fase que fuera capaz de reducir la temperatura del agua de refrigeración de 12°C (temperatura de retorno) a 7°C (temperatura de impulsión).

Como, al igual que en el modo diurno, en modo nocturno (acumulación) la enfriadora produce agua a 7°C, resulta evidente que esta debe ser la temperatura de solidificación del material; en caso contrario, solo se estaría modificando la temperatura del PCM y no se produciría el cambio de fase que permite aprovechar la elevada entalpía de fusión/solidificación que poseen estos materiales (tal y como se ha explicado en el capítulo 3 del presente trabajo).

1.4.1. Circuito de refrigeración

En la figura 1.13, se observa de manera simplificada el circuito del agua de refrigeración.

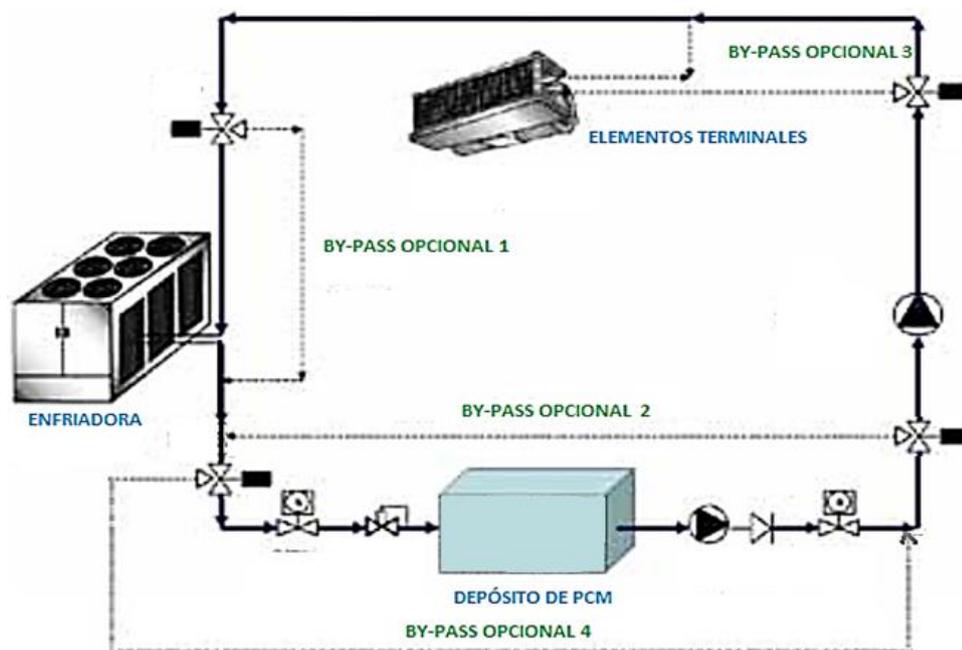


Figura 1.13 (Fuente: pcmproducts.net)

El modo de funcionamiento dependerá del horario en el que se esté usando el sistema de refrigeración [25]:

- En las horas valle (noche): el agua sale de la enfriadora a baja temperatura y se dirige al depósito de PCM. Una vez recorrido el depósito, el agua sale de este a mayor temperatura y toma el camino del by-pass 2, yendo de nuevo a la enfriadora para bajar su temperatura. Esta acción se realizará el tiempo necesario para alcanzar la máxima capacidad de almacenamiento de frío en el depósito y, una vez conseguida, se apagará la enfriadora y se dejará de impulsar agua.
- En las horas pico (día): la enfriadora permanecerá apagada, pero el agua impulsada por las bombas recorrerá el depósito de PCM adquiriendo la temperatura necesaria para refrigerar el edificio (alrededor de 7 °C). Esta se dirigirá a los elementos terminales y posteriormente regresará al depósito pasando por el by-pass 1.

El agua seguirá recorriendo este circuito hasta que el frío en el depósito no sea suficiente para cubrir la demanda en el edificio, en este momento, se encenderá la enfriadora y el agua podrá pasar o no por el depósito, dependiendo de las necesidades de refrigeración del momento.

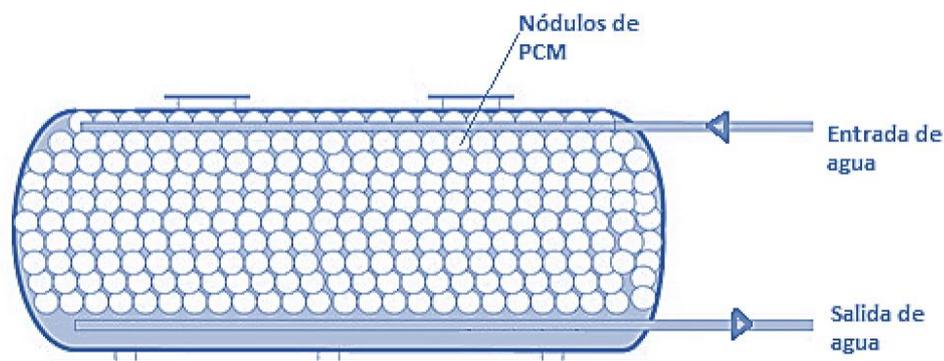


Figura 1.14

En la figura 1.14, se puede observar esquemáticamente un depósito de materiales de cambio de fase. El agua de refrigeración puede recorrer el depósito mediante tuberías o estar en contacto directo con los nódulos o tubos de PCM [25].

En el contexto concreto de este edificio, existen dos lugares donde se podría instalar el depósito de PCM:

- En una zona al aire libre al lado de la enfriadora. Este espacio permite el que agua de refrigeración llegue de la enfriadora al depósito con una pérdida de carga y de temperatura mínima. Como desventaja se tiene que el depósito debe ser capaz de soportar las condiciones climáticas sin que esto afecte al funcionamiento del sistema.

- En la sala de bombas, antes de la impulsión del agua a las diferentes zonas del edificio. En este lugar el depósito estaría cubierto y aislado, por lo que se solucionan los problemas climáticos, pero la pérdida de presión y de temperatura del agua a la entrada del depósito sería mayor que en el primer caso.

CAPÍTULO 2:

**SITUACIÓN DE LA DEMANDA ELÉCTRICA GLOBAL EN
ESPAÑA Y ESTRATEGIAS PARA UN MEJOR
APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE**

2. SITUACIÓN DE LA DEMANDA ELÉCTRICA GLOBAL EN ESPAÑA Y ESTRATEGIAS PARA UN MEJOR APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE

Tal y como se ha comentado en el capítulo anterior, con la implantación de un depósito de PCM en el sistema de refrigeración, no existe un ahorro energético directo en el pleno sentido de la palabra, ya que la electricidad utilizada para producir el frío durante el periodo nocturno es la misma que en el diurno. Inicialmente, se podría concluir que no existe un beneficio ambiental con la instalación del acumulador de frío; sin embargo, se explicará a continuación que no solo hay ahorro económico, sino que el hecho de trasladar el consumo eléctrico de las horas de máxima demanda a las horas de mínima demanda eléctrica contribuye a un uso sostenible de la energía.

2.1. La demanda eléctrica

La demanda eléctrica es el requerimiento de electricidad para abastecer las necesidades que poseen una serie de consumidores. Estas pueden proceder de diferentes sectores, dependiendo de su actividad: industrial, servicios y residencial. Por tanto, la demanda eléctrica en España equivale a la suma de todas las necesidades eléctricas de los consumidores establecidos en el territorio nacional [39]

A lo largo de la jornada, la demanda eléctrica sufre variaciones debido a que la exigencia de los consumidores depende directamente del período en el que se encuentren. Así pues, haciendo la media diaria de todos los días del año (sin distinguir entre estaciones), se obtiene que los picos de consumo (horas punta) son debidos a las actividades laborales (entre las 11:00 y las 12:00 horas) y a la mayor ocupación de los hogares, finalizando el día (alrededor de las 21:00). [27] [41]

En contraposición, la demanda en las horas nocturnas es la mínima diaria (horas valle), ya que las actividades en los hogares y en el sector servicios se ve cesada o reducida considerablemente (entre las 2:00 y las 5:00 de la mañana) tal y como se observa en la figura 2.1. Durante este periodo de baja demanda eléctrica, la actividad más importante procede del sector industrial, debido a que se busca aprovechar también las horas nocturnas, cuando la tarifa eléctrica se reduce considerablemente. A continuación, se presenta un gráfico del consumo de electricidad medio a lo largo de un día:

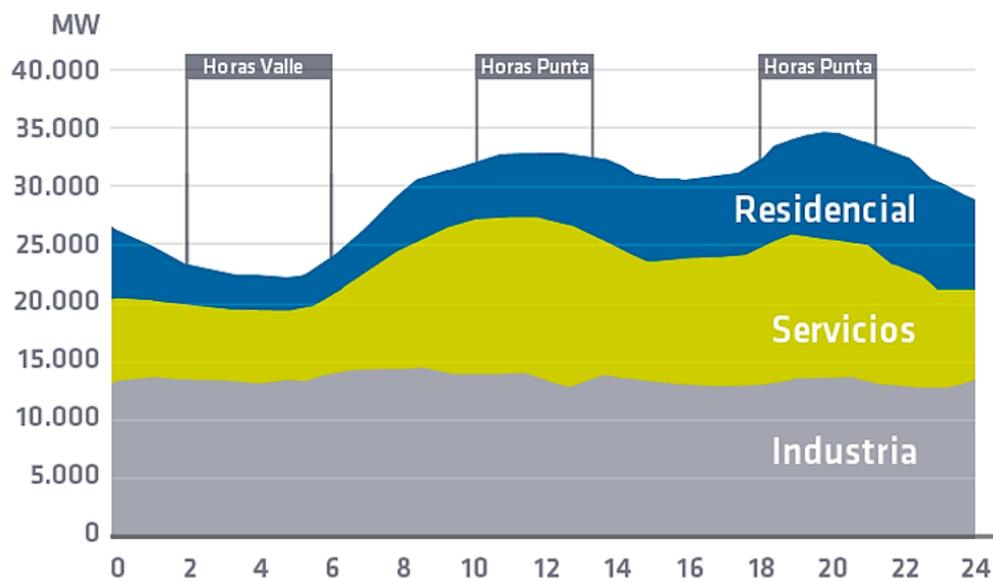


Figura 2.1 [39]

Se debe tener en cuenta que, en relación a la demanda eléctrica, existen únicamente dos periodos: el de invierno y el de verano. Dependiendo de la época del año que se esté considerando, los picos y valles de consumo pueden variar ligeramente. Se mostrará a continuación las diferencias entre las demandas de estas dos etapas.

2.1.1. Demanda eléctrica en invierno

El periodo de invierno abarca desde el último fin de semana de octubre hasta el último de marzo, coincidiendo así con los periodos oficiales de cambio horario [7].

Seguidamente, se estudia la demanda diaria total y la demanda individual de cada sector en el periodo invernal, representadas en las gráficas de las figuras 2.2 y 2.3.

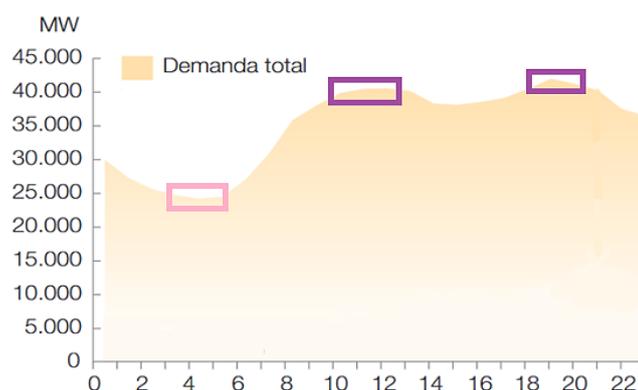


Figura 2.2 (demanda diaria total durante el periodo de invierno [27])

Así pues, la primera hora punta en invierno se dará en un periodo entre las 11:00 y las 13:00 (ver figura 2.2) debido al desarrollo de la actividad laboral, de manera significativa, en el sector servicios (ver figura 2.3). Existe otro

período de máxima demanda correspondiente al del entorno de las 19:00 (ver figura 2.2), donde coinciden el máximo relativo en el sector servicios y el absoluto en el residencial. A partir de esta hora, la demanda en el residencial aumenta (debido a la llegada a los hogares de los residentes), pero en el sector servicios disminuye, ya que, en la mayoría de los casos, cesa la actividad laboral (ver figura 2.3). A partir de las 21:00, se produce una ligera subida en este último sector debido a la necesidad de alumbrado público en las calles [15] [27].

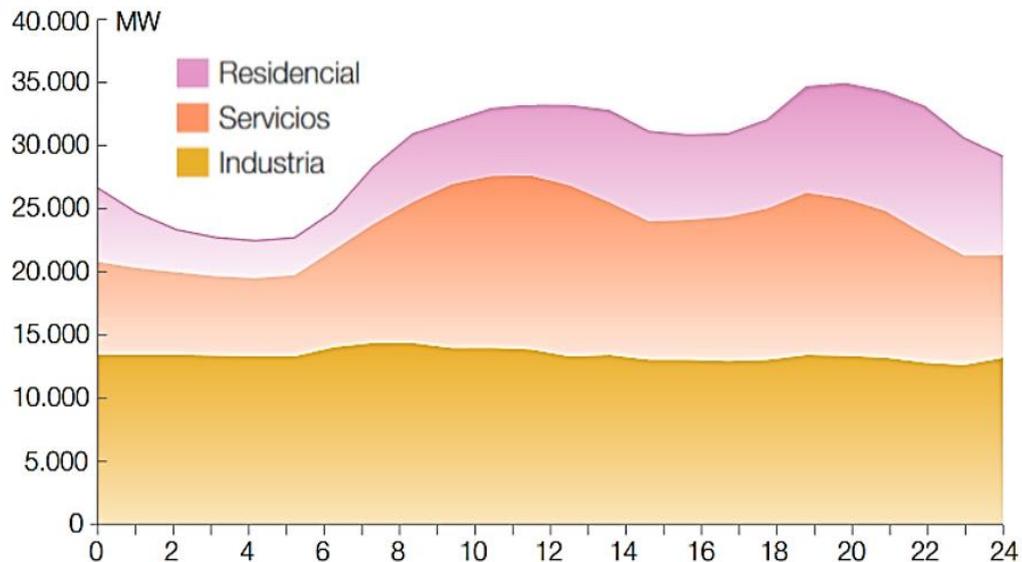


Figura 2.3 (demanda diaria de cada sector durante el periodo de invierno [27])

2.1.2. Demanda eléctrica en verano

El periodo correspondiente a verano abarca desde el último fin de semana de marzo, hasta el último de octubre (complementando a la etapa de invierno vista en el apartado anterior). Dada la naturaleza del proyecto concreto que se está estudiando en este trabajo (almacenamiento de frío para aire acondicionado), este es el periodo al que afectará la instalación del depósito, de tal manera que solo habrá una repercusión en esta época del año (en este caso, de la segunda quincena de abril hasta la primera de mayo) [27].

Se presentan a continuación, en las figuras 2.4 y 2.5, las gráficas de la demanda total en esta etapa y la demanda de un día típico de verano (09/07/18):

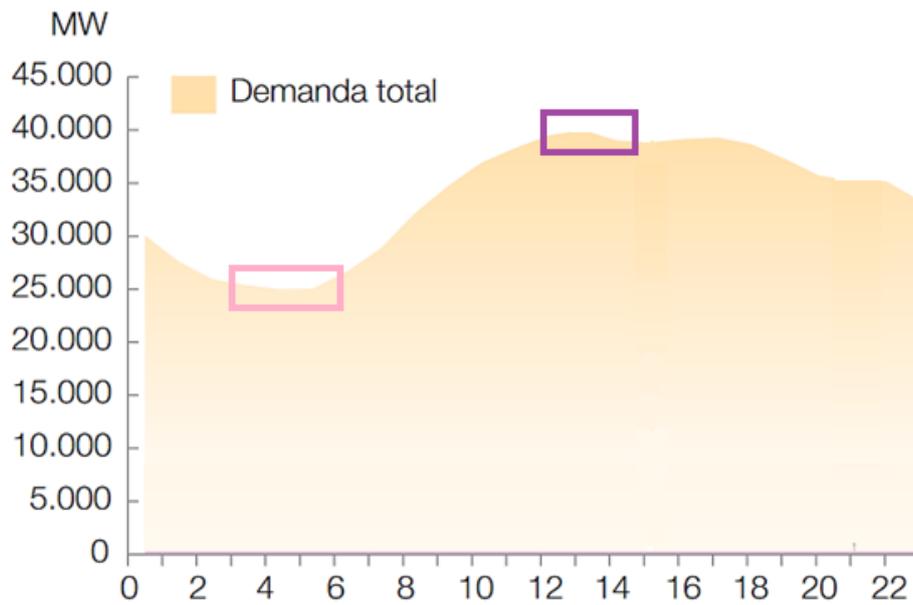


Figura 2.4 [27]

Aquí, las horas punta están más centradas que en invierno, ya que es en las horas centrales cuando se dan los máximos de temperatura (de 13:00 a 15:00). Posteriormente, se observa cómo la demanda disminuye ligeramente a lo largo de la tarde (en su mayor parte debido al cese de actividad laboral). Alrededor de las 22:00 se observa un cambio abrupto en la gráfica, el cual se aprecia de manera más notable en la figura 2.5 (correspondiente al 09/07/18, considerado como un día típico de verano). Se observa, a partir de esta hora con mayor claridad el descenso de la demanda eléctrica, la cual asciende de nuevo a partir de las 6:00 de la mañana, con el inicio de ciertas actividades laborales, domésticas y de transporte [15].

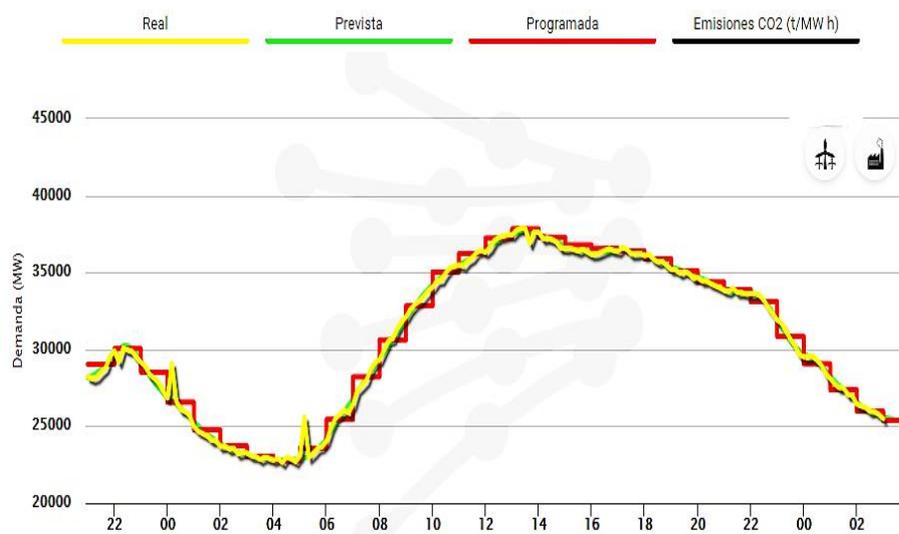


Figura 2.5 [35]

2.1.1. Medidas para un uso sostenible de la energía: iniciativas de gestión de la demanda

Según la *Guía de consumo inteligente* proporcionada por la Red Eléctrica de España: “Las iniciativas de gestión de la demanda tienen como objetivo lograr un perfil de consumo más equilibrado y una mayor flexibilidad de la demanda”. Además, añade que estas medidas (de la gestión de la demanda) están orientadas “a hacer viables los objetivos de sostenibilidad que ha fijado la Unión Europea en su estrategia energética para el 2020: 20 % de reducción de emisiones de CO₂, 20 % de reducción de consumo de energía primaria y 20 % de energía final consumida procedente de fuentes renovables.” [27].

Por lo tanto, el uso sostenible de la energía es la base de estas iniciativas. Se clasifican en cuatro tipos, según la naturaleza de estas y, en consecuencia, según la forma en que modifican la curva de la demanda eléctrica. Las iniciativas son:

6) Reducción del consumo

Esta iniciativa es consecuencia de una concienciación sobre el ahorro energético que se concreta en una mejora de la eficiencia energética de los equipos y procesos. Por tanto, hay una reducción del consumo en todos los puntos de la curva.

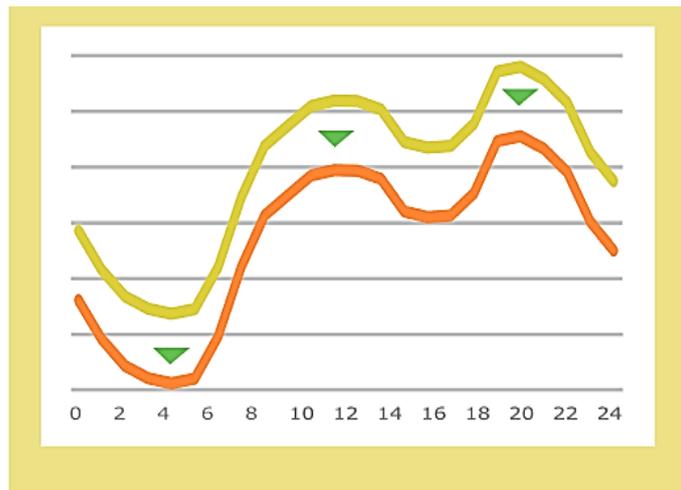


Figura 2.6 [27]

Esto significa que, aunque el consumo de energía se reduce en toda la jornada, esta medida no ayuda a lograr un perfil de consumo más equilibrado que pueda dar mayor estabilidad a la producción de energía eléctrica, ya que la morfología de la curva permanece invariable. La modificación de la demanda se puede observar en la gráfica de la figura 2.6.

7) Desplazamiento del consumo de la punta al valle

Esta iniciativa es una derivación de la discriminación horaria que sufren los diferentes precios de la electricidad en función del momento de la jornada.

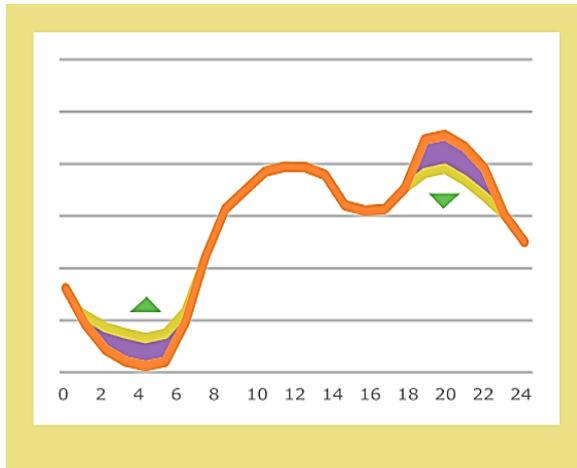


Figura 2.7 [27]

El consumidor, buscando ahorro económico, demanda energía en las horas valle, donde el kWh es más barato, en lugar de consumir esa misma cantidad de energía en las horas pico, donde la electricidad alcanza su precio máximo.

Como la energía que se consume es la misma que antes de la implantación de esta medida, no hay una reducción del consumo en el conjunto de la jornada, pero sí contribuye a obtener un perfil de consumo más equilibrado, tal y como se puede observar en la curva de demanda de la figura 2.7. En el apartado 2.1.2 se tratará esta iniciativa más detalladamente, ya que es la que se busca con la implantación de un acumulador de frío nocturno mediante materiales de cambio de fase.

8) Llenado de valles

Esta iniciativa tiene como objetivo que las nuevas demandas que se puedan incorporar al sistema se produzcan en las horas valle. Algunos ejemplos de estas incorporaciones son: tecnologías de almacenamiento y la recarga de los vehículos eléctricos [26] [27].

En consecuencia, se produce un aumento del consumo en las horas valle, quedando intactas las horas pico.

Este tipo de iniciativas contribuye a la homogeneización de la curva de demanda, y, por tanto, contribuye a mejorar la eficiencia global del sistema eléctrico, pero no fomentan el ahorro energético directo (ver fig. 2.8)

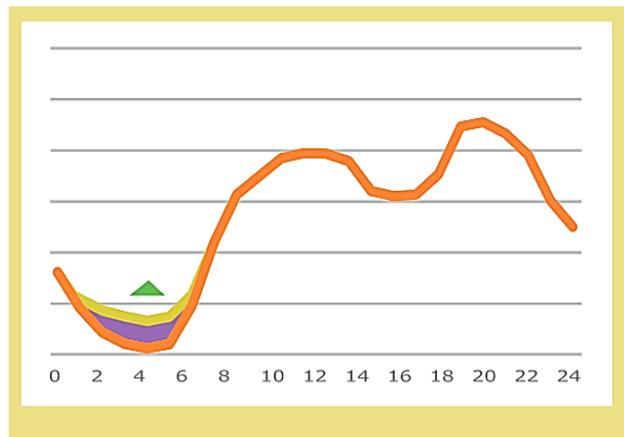


Figura 2.8 [27]

9) Reducción del consumo en las horas punta del Sistema

Esta iniciativa es propia del servicio de los sistemas de control de gestión de cargas e interrumpibilidad. Este último afecta sobre todo a la gran industria.

El servicio de interrumpibilidad se pone en marcha cuando, generalmente en las horas pico, no hay suficiente generación de potencia eléctrica para abastecer la demanda. En estos casos, Red Eléctrica lanza una orden de reducción de potencia a la gran industria, la cual rebaja su consumo para que la generación y la demanda de electricidad se igualen. Las industrias, a cambio, reciben una retribución económica [29] [44].

Tal y como se percibe en la figura 2.9, esto se traduce en una reducción del consumo en las horas pico, lo que permite que las energías renovables puedan hacerse cargo de la mayor parte de la demanda eléctrica.

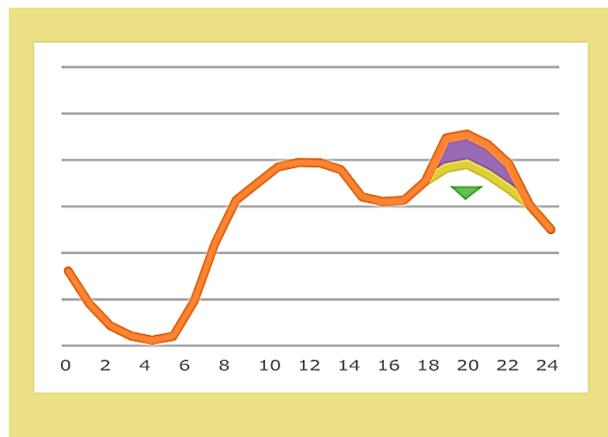


Figura 2.9 [27]

2.1.2. Iniciativa de desplazamiento del consumo de las horas punta a las horas valle: producción de frío en horario nocturno

Tal y como se ha indicado anteriormente, esta es la iniciativa que concierne a este trabajo, ya que el núcleo de este es la utilización de energía eléctrica en las horas valle (horario nocturno) para producir el frío que se empleará en las horas punta (horario diurno y coincidiendo con la máxima demanda) sin necesidad de consumir energía eléctrica.

Tiene como objetivo principal el aplanamiento de la curva de demanda, ya que con una demanda más equilibrada a lo largo de la jornada se consigue [14] [40]:

- Disminuir la posibilidad de existencia de problemas de abastecimiento eléctricos: con una curva plana y constante alrededor de los 30 000 MW, el margen para afrontar una sobrecarga es mayor que si esta se produjera en una hora pico (en la que se pueden alcanzar, aproximadamente, 40 000 MW).
- Aumentar la eficiencia en el sistema eléctrico: “Para mejorar la eficiencia del sistema eléctrico es muy importante que la demanda eléctrica se desplace hacia las horas de menor consumo” [26]. El sistema eléctrico está sobredimensionado para afrontar el exceso de demanda o el fallo en la generación de electricidad que pueda darse en un momento dado. Un excesivo sobredimensionamiento se traduce en ineficiencia a la hora de generación y utilización de esta energía eléctrica, especialmente en las horas valle.
- Integración de energías renovables: los principales retos a los que se deben enfrentar este tipo de energías son: la limitada interconexión con el resto de Europa y la morfología heterogénea de la curva de la demanda. La utilización de sistemas de almacenamiento de energía, como el depósito de materiales de cambio de fase propuesto en este trabajo, posibilitará una mayor integración de renovables. De esta manera, se evita la detención de la producción de electricidad en las horas valle. Estas interrupciones afectan de manera más perceptible a la energía eólica, ya que alcanza su máximo de generación en las horas de menor demanda (ver figura 2.10) [6] [32].

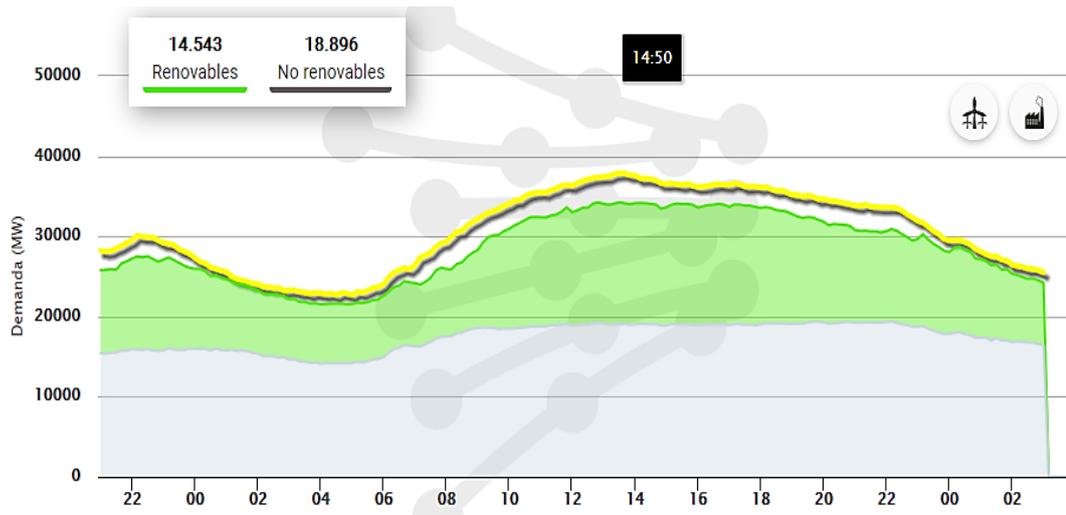


Figura 2.10 (producción de electricidad de fuentes renovables y no renovables en un día típico de verano [35])

- Reducción de emisiones de gases efecto invernadero: debido al mayor protagonismo que el almacenamiento de energía proporciona a las energías renovables. Estas, tal y como se observa en el ejemplo de la energía eólica de la figura 2.11, se caracterizan por sus nulas emisiones de CO₂.

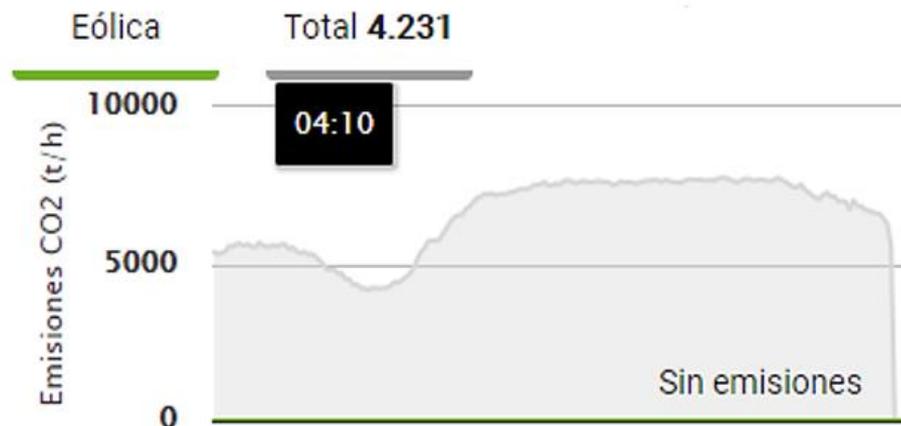


Figura 2.11 [35]

Tal y como se ha visto en este apartado, la acumulación de frío nocturno es una de las medidas recomendadas por la Red Eléctrica de España para mejorar el uso de los recursos energéticos de los que se dispone a nivel nacional.

CAPÍTULO 3:
**PANORÁMICA DE LOS MATERIALES DE CAMBIO DE
FASE (PHASE CHANGE MATERIALS, PCM)**

3. PANORÁMICA DE LOS MATERIALES DE CAMBIO DE FASE (PHASE CHANGE MATERIALS, PCM)

3.1. Introducción

Los materiales de cambio de fase, en inglés *Phase Change Materials* (en adelante, PCM) son aquellos materiales que poseen una entalpía de fusión muy elevada y que, debido a esto, son usados para aplicaciones termoenergéticas relacionadas con el almacenamiento de energía.

Durante el proceso de fusión, el material absorbe la suficiente energía de su entorno como para romper los enlaces entre las partículas, pasando del estado sólido al líquido a temperatura constante. Esta energía no se pierde, sino que queda almacenada en el material en forma de entalpía, la cual, posteriormente, podría ser liberada cuando el material pase de nuevo al estado sólido (solidificación) [8].

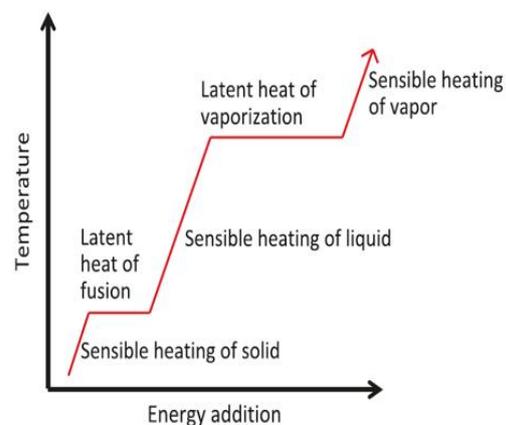


Figura 3.1 ([8] pág. 2)

En la figura 3.2, puede observarse la curva típica de calentamiento de un material genérico.

La entalpía de fusión, llamada también calor latente (calor necesario para que una determinada cantidad de sustancia cambie de fase manteniendo constante su temperatura), generalmente es mayor que el calor sensible (calor necesario para que esa cantidad de sustancia incremente su temperatura sin cambiar el estado de agregación de la materia en el que se encuentra). Por esta razón, para esta aplicación, interesa que la materia cambie de fase, ya que se puede acumular mayor cantidad de energía térmica que si simplemente se elevase la temperatura del material [8] [9].

Los cambios de sólido a líquido (fusión) y de líquido a sólido (solidificación) son los más utilizados, debido a que la variación de volumen no es significativamente grande. Por otro lado, no es conveniente la aparición del estado gaseoso, ya que puede dar problemas de diseño debido a la generación de altas presiones, que pueden ser nocivas, en sus aplicaciones energéticas [8] [9].

Los PCM en edificación pueden ser incorporados a la parte pasiva del edificio (cerramientos, muros etc.) o a los sistemas activos (muy frecuentemente relacionados con la energía solar). Menos frecuente es su uso conjunto con bombas de calor o enfriadoras [9].

El primer PCM básico que se debe mencionar es el agua, con las siguientes características termodinámicas en estado líquido a presión atmosférica [8]:

- T.^a de fusión: 0 °C.
- Calor latente: 334 kJ/kg.
- Densidad: 1000 kg/m³
- Coeficiente de conductividad térmica: 0,58 W/(kg K).

Debido a la limitación de la temperatura a la que el material funde, esta sustancia se emplea para aplicaciones concretas, pero no se puede usar para aquellas relacionadas con el confort térmico (22 °C - 23 °C) o con la climatización de un edificio (7 °C).

3.2. Tipos de materiales de cambio de fase según su composición

Los materiales de cambio de fase se clasifican en materiales orgánicos, inorgánicos y mezclas eutécticas (ver tabla 3.1). Existe un gran número de materiales que, además, abarcan en conjunto un amplio rango de temperaturas. A continuación, se detallan las características propias de cada grupo, así como una subclasificación de cada uno de ellos [16]:

ORGÁNICOS	1. Compuestos de parafina 2. No compuestos de parafina
INORGÁNICOS	3. Sales hidratadas 4. Metálicos
EUTÉCTICOS	5. Orgánico-orgánico 6. Inorgánico-inorgánico 7. Inorgánico-orgánico

Tabla 3.1 [16]

3.2.1. Materiales orgánicos

Estos materiales suelen emplearse en las aplicaciones de almacenamiento térmico debido a que poseen características propicias para este uso, como [20] [23] [28]:

1. Tener estabilidad química y térmica, lo que les hace ser no corrosivos.
2. Abarcar un rango extenso de temperaturas.
3. No experimentar histéresis, es decir, que la temperatura a la que el material solidifica es la misma que la temperatura a la que funde.
4. No sufrir subenfriamiento. Esto es una ventaja para esta aplicación en concreto ya que garantiza la no aparición de un estado metaestable. Asimismo, esto avala el cambio de fase a la temperatura adecuada, asegurando el aprovechamiento máximo de la capacidad de almacenamiento térmico que posee el material.
5. No tener necesidad de agentes nucleadores, ya que el cambio de fase y cristalización del estado sólido se producen de manera espontánea y estable en estos materiales.
6. Poseer puntos de fusión congruentes. Esto significa que no hay segregación de fases, lo que podría originar una modificación de su punto de fusión.
7. Ser reciclables e inoocuos para el medio ambiente.

Por otro lado, poseen desventajas termodinámicas como las siguientes [20] [23] [28]:

1. El cambio de fase se puede producir a lo largo de un intervalo térmico (especialmente en los materiales parafínicos) y esto dificulta los cálculos para la obtención de la temperatura deseada.
2. El calor latente y la entalpía son menores, lo que deriva en que almacenan menor cantidad de energía térmica.
3. Poseen menor conductividad térmica, que provoca que la temperatura desea, bien en el entono, bien en el fluido con el que intercambia calor, se alcance de forma más lenta.
4. Existe una notable diferencia de volumen entre las distintas fases, que dificulta el encapsulado y exige mayor flexibilidad en el diseño.
5. Presentan alto grado de inflamabilidad y la emisión de gases nocivos producidos durante su combustión.
6. Exigen mayor inversión inicial que la de otros materiales.

10)Compuestos de parafina

Son principalmente alcanos (hidrocarburos) obtenidos en el proceso de refinado del petróleo. Suelen ser de cadena lineal y el punto de fusión aumenta

con la longitud de esta (tal y como se puede apreciar en la tabla 3.2: tabla de las parafinas más comunes).

Poseen baja conductividad térmica (característica común en todos los materiales orgánicos), pero el calor latente puede encontrarse entre 200-300 kJ/kg. El punto de fusión abarca un amplio rango de temperaturas (generalmente entre 30 °C y 75 °C), por lo tanto, estos son mayormente empleados para usos termodinámicos en el campo de la electrónica más que para confort térmico [8] [23] [28].

Seguidamente, se incluye la tabla 3.2 con las propiedades termodinámicas de los componentes de la familia de las parafinas más comunes:

Nombre	Temperatura fusión (T _m [°C])	Calor latente [kJ/kg]	Densidad (ρ [kg/m ³])	Coefficiente de conductividad térmica (k [W/(m K)])
Octadecano (C ₁₈ H ₃₈)	29	244	814 (sól.) 724 (líq.)	0,358 (sól.) 0,152 (líq.)
Heneicosano (C ₂₁ H ₄₄)	41	294,9	773 (líq.)	0,145 (líq.)
Tricosano (C ₂₃ H ₄₈)	48,4	302,5	777,6 (líq.)	0,124 (líq.)
Tetracosano (C ₂₄ H ₅₀)	51,5	207,7	773,6 (líq.)	0,137 (líq.)

Tabla 3.2 ([8]) pág. 41)

11) No compuestos de parafina

Es el grupo más numeroso de candidatos para materiales de cambio de fase y se pueden encontrar entre ellos propiedades muy diferentes, no obstante, todos son inflamables, además de inestables a temperaturas elevadas y, por esta razón, no deben ser sometidos a ellas. Entre ellos se encuentran los ésteres, alcoholes, glicoles y ácidos grasos. En general se pueden clasificar en ácidos grasos y el resto de materiales no parafínicos [28].

- Ácidos grasos

Proceden de productos animales y vegetales (formados por largas cadenas de carbono). Pueden presentar puntos de fusión más bajos que los de las

parafinas, lo que los hace más adecuados para aplicaciones relacionadas con el confort de las personas.

Al igual que la mayoría de materiales orgánicos, no se produce en ellos subenfriamiento y presentan un buen comportamiento frente a la repetición del ciclo de fusión-solidificación.

Su fórmula general es: R-COOH, donde R es una cadena alquílica larga con un número par de átomos de carbono, ya que se sintetizan a partir del acetato (CH₃CO₂). El mayor obstáculo que presenta este tipo de material es el precio, puesto que puede ser el doble que el de un compuesto de parafina. También presentan cierto grado de corrosividad [8] [23] [28]. La siguiente tabla 3.3 indica las propiedades de algunos de estos materiales.

Nombre	Temperatura fusión (T _m [°C])	Calor latente [kJ/kg]	Densidad (ρ [kg/m ³])	Coficiente de conductividad térmica (k [W/(m K)])
Ácido cáprico (C ₁₀ H ₂₀ O ₂)	32	153	1004 (sól.) 878 (líq.)	0,153
Ácido láurico (C ₁₂ H ₂₄ O ₂)	44	178	1007 (sól.) 965 (líq.)	0,147
Ácido palmítico (C ₁₆ H ₃₂ O ₂)	64	185	989 (sól.) 850 (líq.)	0,162
Ácido esteárico (C ₁₈ H ₃₆ O ₂)	69	202	965 (sól.) 848 (líq.)	0,172

Tabla 3.3 ([8] pág. 41)

Asimismo, se pueden encontrar mezclas de ácidos grasos, ya que presentan mayor flexibilidad en el ajuste del punto de fusión del material para una aplicación determinada a partir de su composición [8].

3.2.2. Materiales inorgánicos

Estos materiales se pueden subclasificar en sales hidratadas y metálicos. Las propiedades que resultan más ventajosas para almacenamiento de energía térmica son las siguientes [23]:

1. Son más baratos que los materiales orgánicos, especialmente comparándolos con los ácidos grasos.

2. Poseen una elevada conductividad térmica, lo cual permite que se alcance la temperatura deseada en menor tiempo que los orgánicos.
3. Se caracterizan por tener una densidad elevada de almacenamiento de energía térmica.
4. El cambio de fase (fusión o solidificación) se produce a una temperatura constante.
5. No son inflamables lo que proporciona estabilidad a altas temperaturas.
6. Son reciclables, al igual que los orgánicos.

Sin embargo, se deben tener en cuenta otras propiedades que no son beneficiosas para esta aplicación [23]:

1. Poseer una elevada tendencia al subenfriamiento que implica el no aprovechamiento de toda su capacidad de almacenamiento térmico al no producirse el cambio de fase a la temperatura deseada.
2. Presentar generalmente fusión incongruente, y los aditivos usados para solventar el problema reducen su entalpía.
3. Tener necesidad de aditivos si se requiere un uso prolongado.
4. Ser potencialmente corrosivos en contacto con ciertos materiales metálicos.
5. La posibilidad de sufrir histéresis de transición de fase, lo que deriva en la no coincidencia de los puntos de fusión y el de solidificación tras la repetición de cierto número de ciclos [43].

12) Sales hidratadas

Estas están compuestas por una sal inorgánica y agua. En el proceso de fusión generalmente se obtiene la misma sal con menor número de moles de agua (menos hidratada) y agua; es este precisamente el mayor problema del uso de estos materiales como PCM ya que se produce una fusión incongruente (que produce cambio de la temperatura de fusión y de la composición del material) y los aditivos que se usan para salvar esta complicación reducen su capacidad de almacenamiento de energía térmica.

Este tipo de materiales tiene una alta tendencia al subenfriamiento, lo cual supone un problema de inestabilidad para los posteriores ciclos termodinámicos que sufre el material y para el almacenamiento de la energía (ya que es mucho menor el calor sensible que el latente en este tipo de materiales) [8] [28].

En contraposición a lo explicado anteriormente, esta clase de materiales también poseen ciertas ventajas: tener un coste bajo comparado con los materiales orgánicos (su base en agua reduce significativamente el coste), gran capacidad de almacenamiento de calor por unidad de volumen y no inflamabilidad [28].

A continuación, en la tabla 3.4, se muestran las propiedades termodinámicas de algunas de las sales hidratadas más comunes para este tipo de aplicaciones:

Nombre	Temperatura fusión (T_m [°C])	Calor latente [kJ/kg]	Densidad (ρ [kg/m ³])	Coefficiente de conductividad térmica (k [W/(m K)])
Cloruro de magnesio hexahidratado ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$)	117	168,6	1450 (líq.) 1569 (sól.)	0,579 (líq.) 0,694 (sól.)
Cloruro de calcio hexahidratado ($CaCl_2 \cdot 6H_2O$)	29	170-192	1562 (líq.) 1802 (sól.)	0,561 (líq.) 1,008 (sól.)
Sulfato de sodio decahidratado ($NaSO_4 \cdot 10H_2O$)	32	251	1485 (sól.)	0,544

Tabla 3.4 ([8] pág. 44)

13) Metálicos

Esta clase de PCM es la menos estudiada de todas las vistas anteriormente, no se han considerado candidatos a materiales de cambio de fase debido a que su densidad es muy alta, lo cual multiplicaría el peso del edificio (si se encontrasen mezclados con los materiales de construcción) o del depósito de materiales de cambio de fase. No obstante, ya desde 2013 se encuentran proyectos de investigación [10] que buscan dar más uso a los metales o aleaciones metálicas en este tipo de aplicaciones, ya que presentan una ventaja considerable frente al resto de opciones: su elevada conductividad térmica (ej.: la conductividad térmica del aluminio es 237 W/m K frente a 1,008 del cloruro de calcio hexahidratado visto anteriormente).

Además de esta característica beneficiosa, los metales muestran estabilidad a altas temperaturas, no presentan problemas de fusión incongruente ni desgaste tras someterse repetidamente al ciclo de fusión-solidificación. A pesar de esto, la escasez de estudios que tienen en cuenta los metales para almacenamiento de energía y la alta densidad que poseen (que origina en elevado peso y baja entalpía), son factores que se deben tener muy presente a la hora de la elección del PCM.

A continuación, en la tabla 3.5, se presenta un cuadro comparativo de las propiedades termodinámicas de dos metales (cesio, con bajo punto de fusión; y aluminio, con alto punto de fusión) con las de un material orgánico y una sal hidratada [8].

Nombre	Tipo de material	Temperatura fusión (T _m [°C])	Calor latente [kJ/kg]	Densidad (ρ [kg/m ³])	Coefficiente de conductividad térmica (k [W/(m K)])
Octadecano (C ₁₈ H ₃₈)	orgánico	29	244	841 (sól.) 724 (líq.)	0,358 (sól.) 0,152 (líq.)
Cloruro de calcio hexahidratado (CaCl ₂ · 6H ₂ O)	Sal hidratada	29	170-192	1562 (líq.) 1802 (sól.)	0,561 (líq.) 1,008 (sól.)
Cesio	Metal (bajo punto de fusión)	28,65	16,4	1796	17,4
Aluminio	Metal (alto punto de fusión)	661	338	2700	237

Tabla 3.5 ([8] pág. 44)

3.2.3. Eutécticos

Son mezclas homogéneas, de dos o más componentes, en las que se da una proporción única entre ellos que tiene como resultado que los eutécticos poseen un punto de fusión menor que el que tienen los componentes individualmente. Difícilmente estos materiales padecen disgregación de fases en la solidificación o en la fusión, ya que ambas fases se congelan o se licúan simultáneamente, al igual que tampoco presentan subenfriamiento. Principalmente, la investigación se ha centrado en las mezclas eutécticas de ácidos grasos que serían del tipo orgánico-orgánico, pero existe la posibilidad de mezclas inorgánico-inorgánico o, incluso, inorgánico-orgánico [28].

El principal problema que se encuentra en la aplicación de este tipo de materiales es el de ser un campo en el que todavía hay mucho margen de investigación y mejora de la composición y pureza de las mezclas. Al mismo tiempo, puede existir un tercer elemento que influye en las propiedades termodinámicas de la mezcla: la matriz sólida que se utiliza para el microencapsulamiento del eutéctico, la cual es empleada para mejorar el almacenamiento de energía térmica. Esto dificulta notablemente la comercialización y normalización de las mezclas con sus respectivos soportes sólidos, lo que resulta una dificultad añadida a hora de encontrar un candidato para la aplicación deseada [2].

3.3. Métodos de encapsulación

Una vez definidos los tipos de materiales según su naturaleza que se pueden encontrar, la forma de incorporar los PCM adquiere gran importancia en su aplicación y ejecución. Aparece la cuestión de cómo trabajar con el material: directamente, sin encontrarse dentro de ningún contenedor, o, por el contrario, se necesita de alguna técnica que evite que el PCM se derrame cuando se encuentre en fase líquida. La gran mayoría de aplicaciones precisan de lo segundo. Se debe tener en cuenta además que, independientemente del método de encapsulamiento, el PCM no debe reaccionar con el material que lo contiene para evitar la corrupción de las propiedades termodinámicas del mismo [30].

3.3.1. Método Bulk storage

Este método de almacenamiento a granel, o *Bulk storage* en inglés, consiste en la introducción del material de cambio de fase directamente en un depósito, cuyo comportamiento es muy similar al de un intercambiador de calor. Su principal ventaja es su alta rentabilidad, derivada del ahorro que supone la no necesidad de encapsulamiento del PCM en nódulos independientes (como se verá en otros métodos) al estar contenido directamente en el tanque [30].

Por otra parte, se encuentra el gran inconveniente de que la conductividad térmica que este método presenta es muy baja. Las soluciones que se pueden implantar se centran en aumentar la superficie de transferencia: insertando aletas, y en la introducción de elementos que aumenten la conductividad del PCM: utilizando partículas de alta conductividad o estructuras metálicas [30] [22].

3.3.2. Método de macroencapsulación

Este es el método más comúnmente utilizado. El PCM es encapsulado en un recipiente individual, cuya medida nominal sea mayor de 1 mm,

independientemente del estado de agregación del material. Esta macrocápsula puede adquirir diversas formas, como: panel rectangular, tubería, bolsa, etc. En la figura 3.2 se ejemplifica la estructura que puede adquirir la cápsula.



Figura 3.2 [43]

El diseño y el material con el que se fabrican las unidades de macroencapsulación proporcionan la máxima transferencia de calor, ya que, de lo contrario, se produciría solidificación permanente en los bordes de los recipientes y eso dificultaría su actuación. También son anticorrosivas, lo que permite que el PCM contenido pueda ser de naturaleza orgánica. La flexibilidad en la forma y el amplio rango de escala que abarca permiten que este método pueda emplearse incluso para aplicaciones en edificios de cierto grado de dificultad [20] [22] [30].

3.3.3. Método de microencapsulación

Este método consiste en introducir en una matriz homogénea o heterogénea o en revestir con una película continua una minúscula cantidad de PCM, creando así cápsulas de 0,1 μm hasta 1000 μm de tamaño. Se distinguen dos partes principales: el núcleo, constituido por el material de

cambio de fase y la carcasa, polimérica o inorgánica que actúa como recipiente, tal y como se observa en la fig. 3.2). La microencapsulación puede adquirir diversas formas, las dos más empleadas son: polvo seco, que puede emplearse directamente o ser disuelto, y disperso en un líquido (esta forma se denomina *slurry* en inglés) [13] [22].

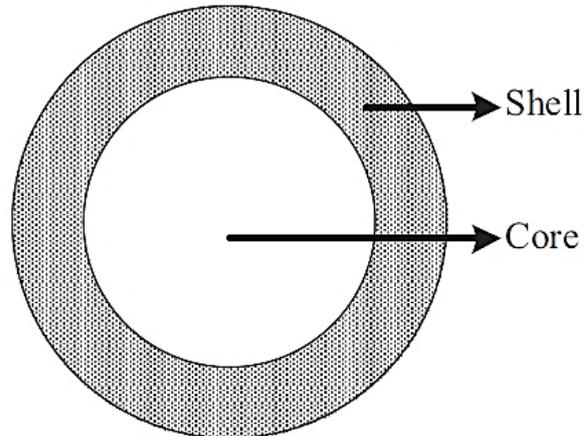


Figura 3.3 ([30] pág. 532)

Los métodos para realizar el microencapsulamiento dependen de las propiedades físicas y químicas de los materiales empleados. Pueden ser físicos, como el denominado extrusión centrífuga; fisicoquímicos, como la coacervación o químicos, tales como la polimerización interfacial [13] [22].

El campo de aplicación de este método es muy amplio, ya que puede abarcar usos en agricultura, farmacia, alimentación, textil o edificación.

3.4. Criterio de selección del PCM

3.4.1. Propiedades deseables en un PCM para almacenamiento de energía térmica

La primera propiedad que se tiene que tener en cuenta a la hora de escoger el tipo de material que se va a emplear es el punto de fusión. Este debe estar por debajo de la temperatura de la fuente de la que va a absorber el calor y por encima de las condiciones ambientales en las que se encuentre el material.

Tras la selección de un material que se adapte al rango en el que se va a trabajar, la siguiente propiedad que debe ser estudiada es el calor latente o entalpía de fusión/solidificación (cuánta energía térmica se puede almacenar o liberar en una determinada cantidad de masa del material durante el proceso de fusión o solidificación). Un alto calor latente suele ir acompañado por un alto calor específico (la cantidad de calor necesario para elevar un kelvin un kilogramo de masa de un material concreto).

Interesa que el material que se va a seleccionar tenga un alto valor de estas dos propiedades, lo que conduciría a una mayor eficiencia energética y una disminución de la masa de este, conduciendo a una configuración más compacta. Desde el punto de vista dinámico, hay que tener en cuenta, así mismo, aspectos cinéticos del material como la velocidad de nucleación o de crecimiento de los cristales.

El aspecto económico asimismo es importante, ya que de este depende el proyecto que se desea realizar. El material escogido debe ser rentable y su precio, proporcional al del resto de la instalación.

También otras propiedades secundarias que deben ser tenidas en cuenta: estabilidad física y química (comportamiento frente a las sucesivas repeticiones del ciclo termodinámico de fusión-solidificación), corrosión (compatibilidad química con los materiales con los que va a estar en contacto), inflamabilidad, conductividad térmica, etc.

Así pues, las propiedades que se deben estudiar a la hora de escoger un material de cambio de fase con el que se desee trabajar han de conjugar aspectos termodinámicos, cinéticos, químicos y económicos [8].

CAPÍTULO 4:

FUNDAMENTOS TERMOENERGÉTICOS DE LA PRODUCCIÓN DE FRÍO

4. FUNDAMENTOS TERMOENERGÉTICOS DE LA PRODUCCIÓN DE FRÍO

Como el presente trabajo se encuentra en el contexto de una instalación de refrigeración, conviene dar una visión global de la producción de frío. La descripción irá desde los conceptos más generales hasta la explicación del funcionamiento concreto de los diferentes elementos que forman parte de la instalación del edificio estudiado.

4.1. La producción de frío y el enunciado de Clausius del Segundo Principio

El enunciado de Clausius del Segundo Principio dice lo siguiente:

“Es imposible la existencia de un sistema que pueda funcionar de modo que su único efecto sea la transferencia de energía en forma de calor de un foco frío, a temperatura T_f , a otro de mayor temperatura, T_c ” [5].

Es decir, el calor va de manera espontánea del foco más caliente al más frío y no al contrario, tal y como se muestra en la figura 4.1.

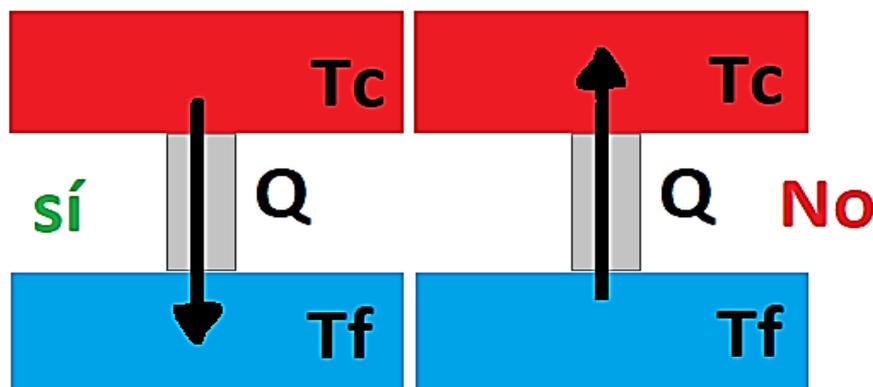


Figura 4.1

Para conseguir el efecto contrario (extraer calor del foco frío para llevarlo al caliente) se necesitaría introducir un trabajo adicional [5]. Esta es la base termodinámica de una máquina frigorífica, cuyo funcionamiento se puede ver gráficamente en la figura 4.2.

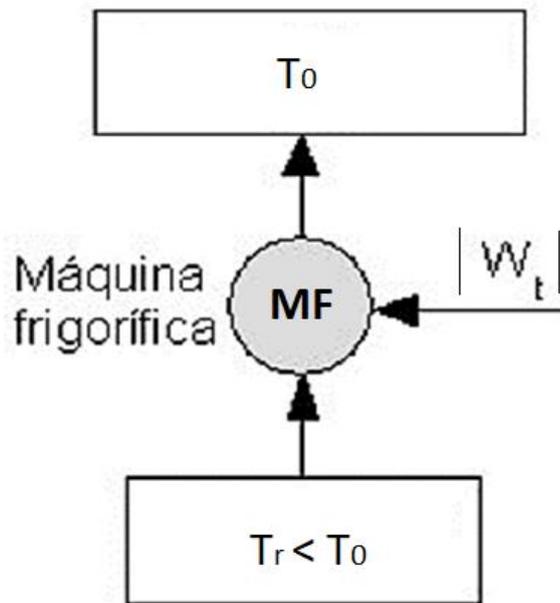
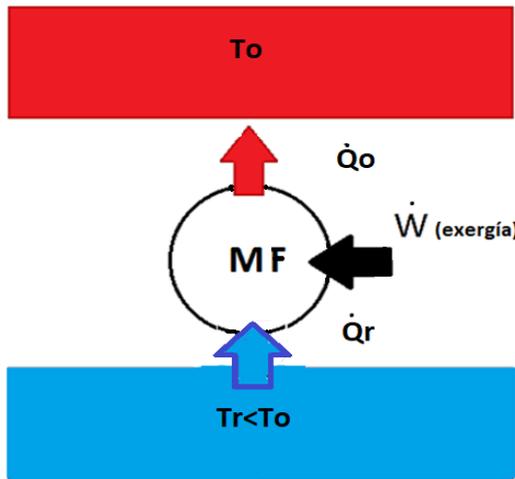


Figura 4.2 (Fuente: <https://www.monografias.com>)

4.2. La producción de frío ideal con una máquina frigorífica de Carnot

De acuerdo con el Segundo Principio de la Termodinámica recogido en el enunciado de Clausius, se necesita aportar una cantidad de trabajo mínima (denominada exergía del frío) para lograr extraer una cierta cantidad de calor de un foco frío, T_r y transferirlo a un foco más caliente (generalmente el ambiente), T_0 . Se denomina al calor por unidad de tiempo extraído del foco frío potencia frigorífica (\dot{Q}_r) [21].

Utilizando el lenguaje exergético, se define la potencia exergética del frío (\dot{E}^Q) como la necesidad mínima de potencia útil que debe emplearse para extraer una potencia frigorífica, \dot{Q}_r , de T_r (con $T_r < T_0$) en presencia de un ambiente a temperatura T_0 . Esta potencia mínima que hay que aportar lo da la máquina frigorífica de Carnot que representa el ciclo ideal, sin ningún tipo de irreversibilidad, entre los dos focos citados [5] [21] cuyo valor viene dado por la ec. 4.1.



Exergía del frío:

$$\dot{W}_{\min} = \dot{E}^Q = |\dot{Q}_r| \left(\frac{T_0}{T_r} - 1 \right)$$

(ec. 4.1)

Figura 4.3

Como se observa en la ecuación 4.1, la potencia exergética del frío depende, como función inversa de la temperatura del foco frío (T_r), de manera que cuanto menor sea la temperatura del foco frío, tanta más potencia exergética será necesaria para trasladar la potencia frigorífica del foco frío al foco caliente. Esta potencia también aumentará cuanto mayor sea la potencia de refrigeración (\dot{Q}_f) o cuanto más elevada sea la temperatura del foco caliente o ambiente (T_0). Esto está representado gráficamente en la figura 4.4.

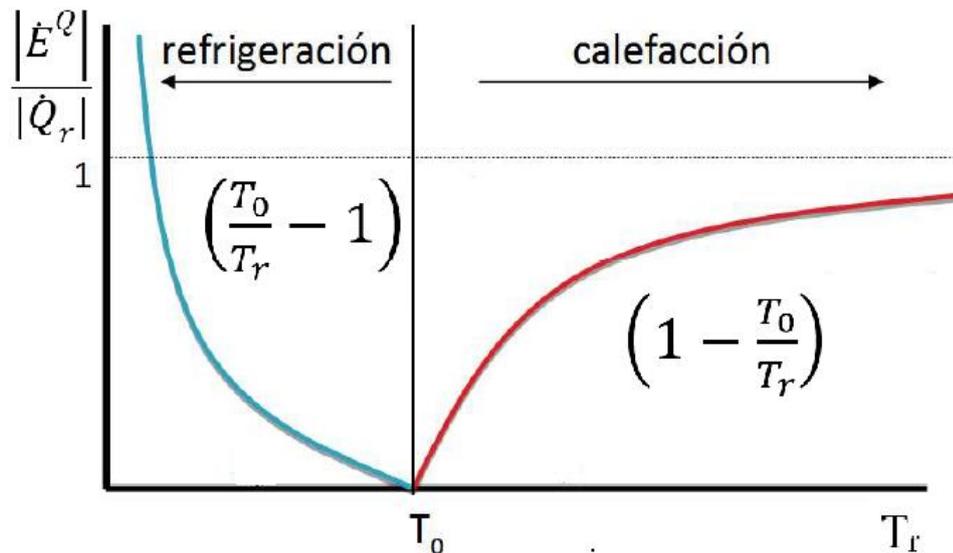


Figura 4.4 [5]

En la parte izquierda de la gráfica (refrigeración) se observa, aparte de lo explicado anteriormente, la imposibilidad trabajar con una fuente térmica cuya temperatura fuese el cero absoluto (0 K) y extraer calor de ella, ya que la energía necesaria para ello sería infinita, tal y como se ve en la aproximación asintótica de la exergía del frío al valor de $T_r = 0$ K.

En la parte derecha de la gráfica está representada la exergía del calor a temperatura $T_r > T_0$, que se define como la capacidad máxima de potencia útil que se obtiene al extraer una potencia calorífica (\dot{Q}_r) de un foco térmico caliente a temperatura T_r y en presencia de un ambiente a temperatura T_0 [5] [21]. Esta tiende asintóticamente hacia la unidad, ya que es imposible transformar el 100% del calor en trabajo útil. Cuanto mayor sea la temperatura del foco caliente (T_r), más cantidad de calor se podrá transformar en trabajo.

4.3. Parámetros energéticos de una máquina frigorífica cualquiera

Existen dos parámetros característicos de una máquina frigorífica cualquiera que ayudan a caracterizar la eficiencia de su funcionamiento: el coeficiente de rendimiento ('coefficient of performance'- COP) y el rendimiento exergético (ψ). Ambos se encuentran definidos a continuación.

4.3.1. Coeficiente de rendimiento (COP)

Este parámetro compara la potencia de refrigeración extraída del foco frío (el efecto útil) con la potencia útil real que se ha tenido que aportar para ello (ver ec. 4.2). Generalmente su valor es mayor que la unidad [5] [38].

$$COP = \frac{\dot{Q}_f}{\dot{W}_{real}} \quad (\text{ec. 4.2})$$

En una máquina frigorífica por compresión de vapor, esta potencia útil es la que se debe aportar al compresor, tal y como se explica más adelante en el apartado 4.4. Es decir, el COP indicaría los kW de potencia de refrigeración que se logran extraer del foco frío por cada kW de potencia consumida por el compresor.

4.3.2. Rendimiento exergético (ψ)

El rendimiento exergético (ψ) es aquel que compara la parte exergética (parte transformable en trabajo útil) de las diferentes energías del COP. Dado que este parámetro compara energías de la misma calidad, se puede ver como la medida de la degradación energética que ha tenido lugar en la máquina frigorífica [5] [17].

$$\psi = \frac{\dot{W}_{min}}{\dot{W}_{real}} = \frac{\dot{E}^Q}{\dot{W}_{real}} \leq 1 \quad (\text{ec. 4.3})$$

Como se observa en la ecuación 4.3, para hallar el rendimiento exergético se debe dividir la potencia mínima que se tendría que aportar para extraer una determinada potencia frigorífica (exergía del frío) entre la potencia real que se aporta al ciclo frigorífico (lógicamente esta última siempre es mayor) [17].

4.4. Ciclos de refrigeración de las enfriadoras de la instalación de estudio

Existen diversos métodos de producción de frío como las máquinas frigoríficas por compresión de vapor o las enfriadoras de adsorción y absorción. En este apartado se centrará la descripción únicamente en el primer método ya que la refrigeración por compresión de vapor es el más utilizado en edificios de sector residencial y no residencial.

La instalación estudiada en la sede de las Cortes de Castilla y León no es una excepción, ya que presenta tres enfriadoras (dos refrigeradas por aire y una por agua) que son máquinas frigoríficas por compresión de vapor (ver figura 1.2 del trabajo pag. 20).

4.4.1. Máquina frigorífica de compresión de vapor

Se puede observar, en las siguientes figuras 4.5 y 4.6, el diagrama T-s de del proceso de compresión de vapor, así como los elementos que lo conforman: compresor (A), evaporador (B), válvula (C) y evaporador (D). Los siguientes apartados se han dedicado a la explicación detallada de cada uno de ellos [11] [19] [21].

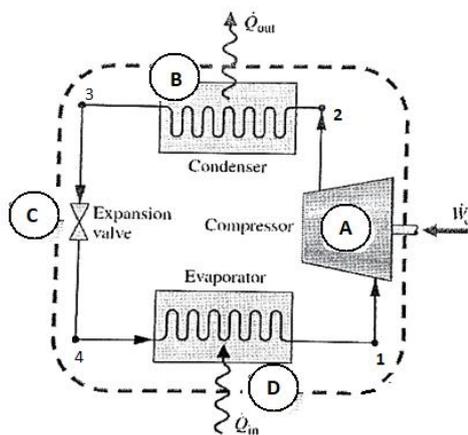


Figura 4.5

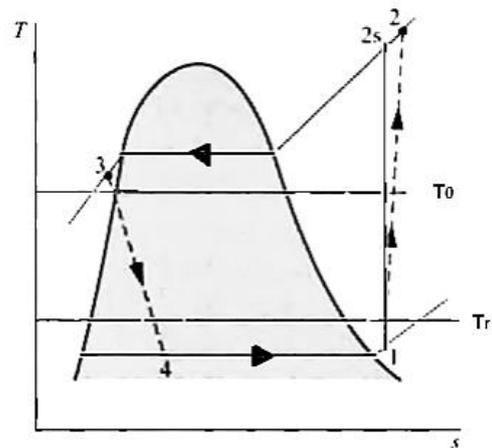


Figura 4.6

El ciclo termodinámico del proceso es:

- 1-2. **Compresor (A)**: compresión adiabática del vapor saturado (de p_0 a p).
- 2-3. **Condensador (B)**: enfriamiento a presión constante.
- 3-4. **Válvula de expansión (C)**: expansión irreversible de líquido comprimido hasta la presión inicial (p_0).
- 4-1. **Evaporador (D)**: absorción de calor a presión constante.

1) Elementos de la máquina frigorífica de compresión de vapor

- Compresor (A)

El proceso real que sigue el fluido es el indicado por una línea discontinua en el diagrama de la figura 4.7. El refrigerante entra en el compresor (1) en forma de vapor saturado o ligeramente sobrecalentado (para evitar problemas por causa de la aparición de líquido) a la presión p_0 (baja presión) y temperatura baja. Se realiza una compresión adiabática y el fluido sale en forma de vapor sobrecalentado (2) a presión p (alta presión) y alta temperatura (ver figuras 4.7 y 4.8). El proceso de compresión que ocurriría entre 1 y 2s, es reversible (ideal) y, por consiguiente, isoentrópico [21].

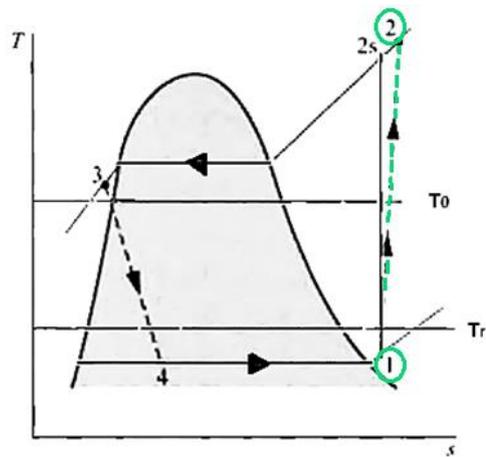


Figura 4.7

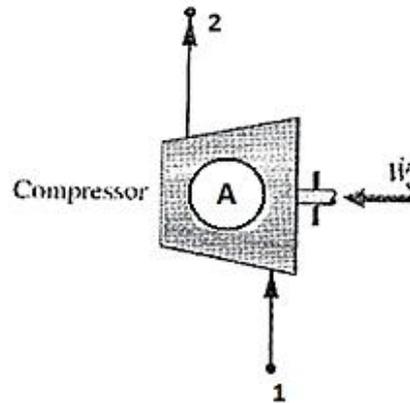


Figura 4.8

El trabajo necesario en el compresor para llevar al fluido desde el estado 1 al 2 (\dot{W}_{12}) viene reflejado en la ecuación 4.4:

$$\dot{W}_{12} = \dot{m}(h_1 - h_2) = \frac{\dot{m}}{\eta_{sc}}(h_1 - h_{2s}) \quad (\text{ec. 4.4})$$

Donde:

- \dot{m} : gasto másico [kg/s].
- h_i : entalpía para los diferentes estados del fluido [kJ/kg].
- η_{sc} : rendimiento isentrópico que representa las irreversibilidades ocurridas en el proceso adiabático.
- Condensador (B)

El vapor entra en el condensador (2) en forma de vapor sobrecalentado a muy alta temperatura. Se produce una cesión de calor del fluido refrigerante a otro medio (foco caliente), y este pasa de vapor sobrecalentado a condensarse en líquido comprimido (3) disminuyendo su temperatura. Todo este proceso se produce a presión constante p (alta presión) (ver figuras 4.9 y 4.10).

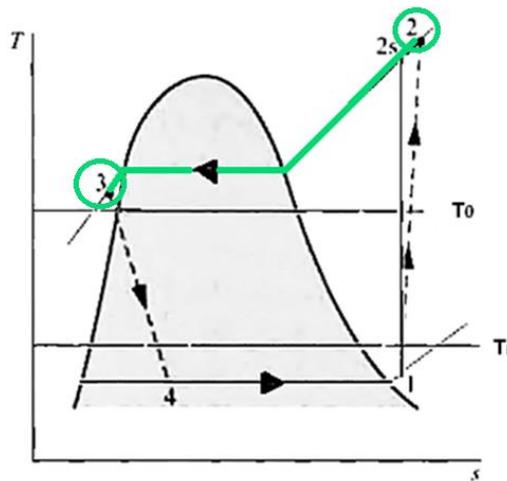


Figura 4.9

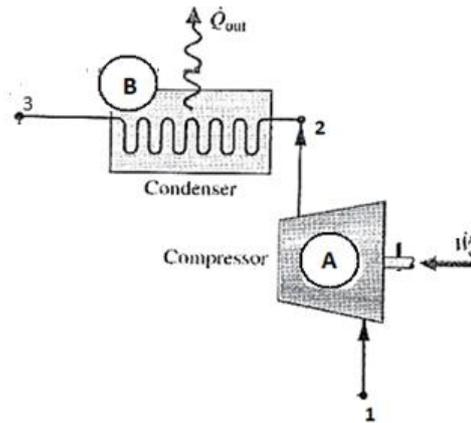


Figura 4.10

El calor cedido del fluido al foco caliente en el condensador (\dot{Q}_{23}) viene reflejado en la ecuación 4.5:

$$\dot{Q}_{23} = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (\text{ec. 4.5})$$

▪ Válvula de expansión (C)

Como se puede observar en el diagrama de la figura 4.11, este proceso es irreversible (línea discontinua). El fluido a alta presión (3) entra en la válvula y sufre una expansión manteniendo la entalpía constante ($h_3 = h_4$). La presión del refrigerante desciende hasta volver a tener la presión inicial (p_0) (4).

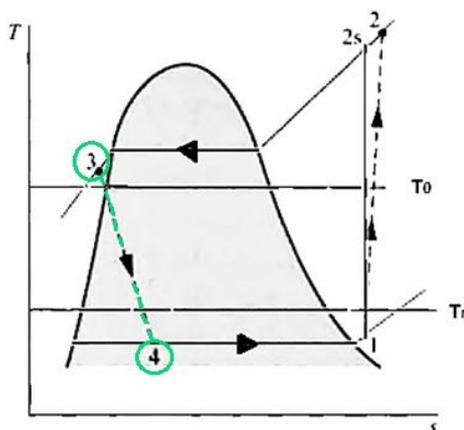


Figura 4.11

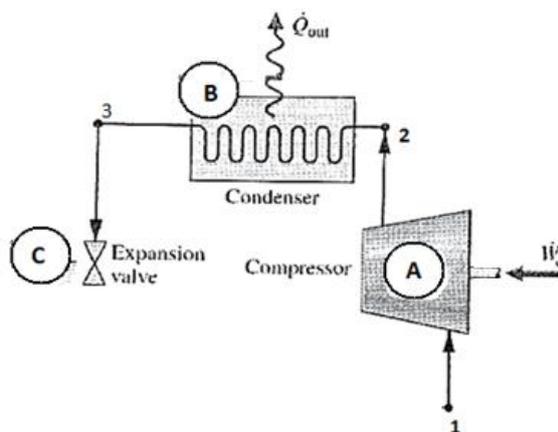


Figura 4.12

1) Condensación por aire (ACC)

En este tipo de enfriadoras, el medio utilizado para disipar este calor es el aire. Destaca por su sencillez en la ejecución. En la parte del condensador se usan ventiladores axiales que mueven un flujo de aire que, cuando se pone en contacto con los tubos que transportan el refrigerante, absorbe el calor cedido por este. El flujo de aire, por lo tanto, aumenta su temperatura y es expulsado al exterior por los ventiladores, mientras que el refrigerante, habiendo bajado su temperatura, sale del condensador en forma de líquido comprimido.

La figura 4.15 representa, de manera esquemática el funcionamiento de un sistema de refrigeración condensado por aire (solo la parte del condensador).

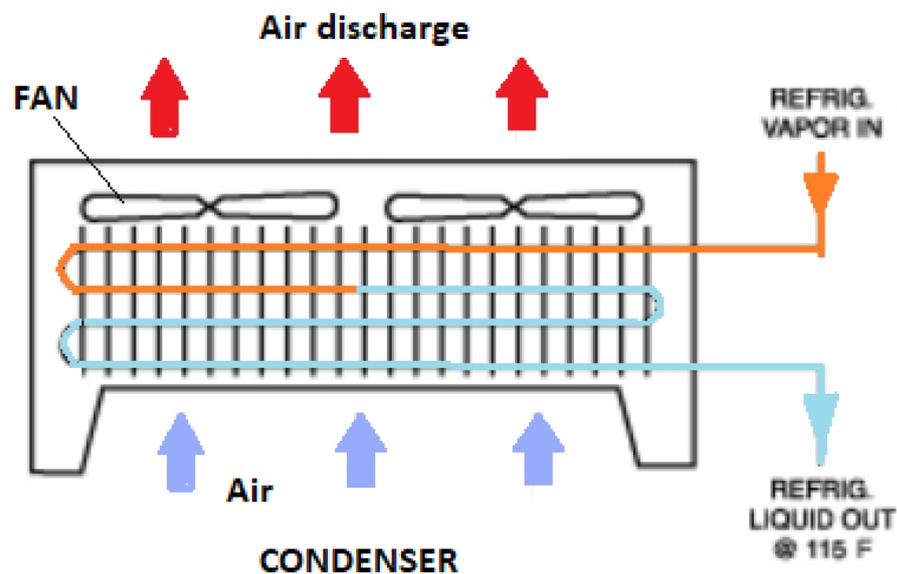


Figura 4.15

Este tipo de sistemas tiene la ventaja de la sencillez en el funcionamiento y mantenimiento. Además, al no utilizar agua para la disipación de calor, el riesgo de aparición de legionela en el sistema de refrigeración es mínimo. La desventaja principal es su bajo rendimiento comparado con la condensación por agua, por lo tanto, las emisiones de CO₂ y el coste eléctrico son mucho mayores que en este segundo sistema. Estas últimas características hacen que su uso esté disminuyendo [11] [12].

2) Enfriamiento por agua (WCC)

Este segundo sistema tiene mayor complejidad que el de ACC. En este caso, es el agua la encargada de disipar el calor en el condensador. El agua recorrerá

este sin estar en contacto directo con el refrigerante y luego será transportada hasta la torre de refrigeración, donde será enfriada nuevamente.

En la figura 4.16 se observa una torre de refrigeración tradicional, donde el agua se pulveriza y es enfriada por una corriente de aire. Este tipo de instalación está en desuso por el riesgo de transmisión de legionelosis.

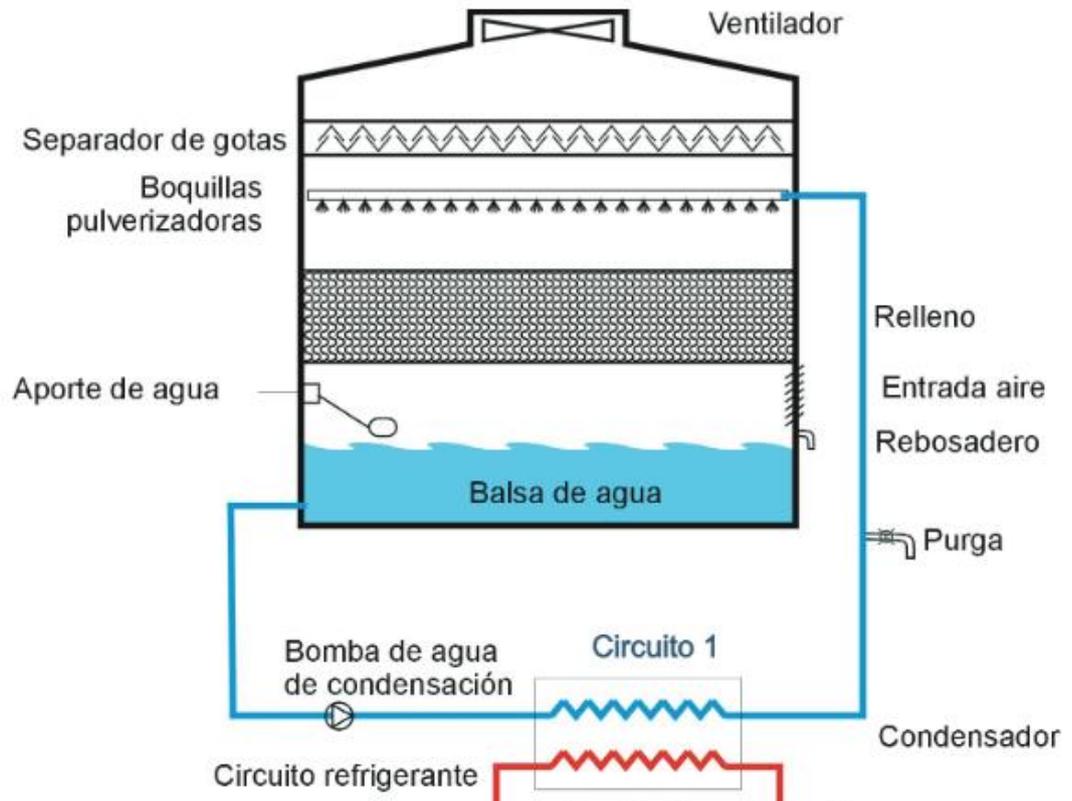


Figura 4.16 (Fuente: <https://www.mscbs.gob.es>)

Para evitar la legionela, se han desarrollado otros métodos de enfriamiento como son los enfriadores adiabáticos que, además, proporcionan mejor rendimiento a la instalación de refrigeración que las torres de enfriamiento tradicionales. Esta es la instalación utilizada en la sede de las Cortes de Castilla y León y su funcionamiento está representado de manera esquemática en la figura 4.17.

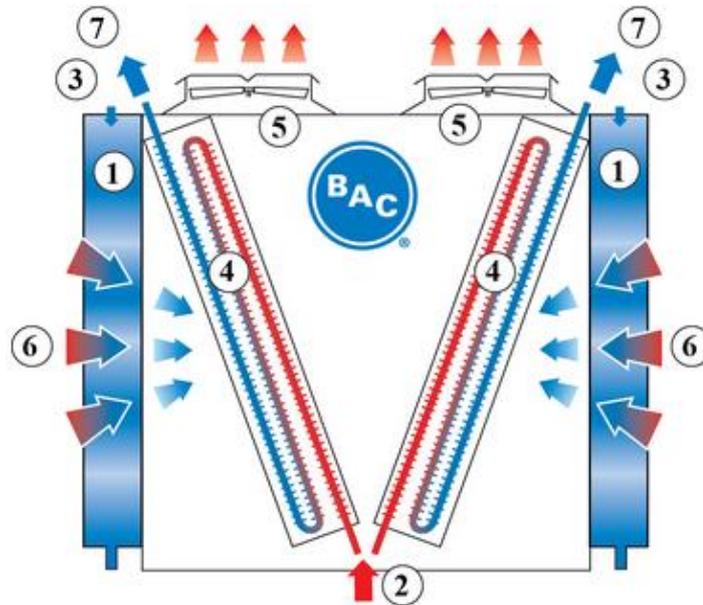


Figura 4.17(fuente: <https://www.evapco.com>)

Se podría utilizar aire en las condiciones ambiente para enfriar el agua (proceso A), pero, para mejorar la eficiencia del proceso, se suelen usar preenfriadores adiabáticos (1), que son almohadillas humedecidas por un flujo de agua líquida (3) (proceso B).

La corriente de aire (6), movida por los ventiladores axiales (5), atraviesa los preenfriadores, aumentando su humedad y disminuyendo su temperatura. Este aire se pone en contacto con los serpentines que transportan el agua del circuito secundario que se desea enfriar (4). Esta cede calor a la corriente de aire, que es expulsada a través de los ventiladores mencionados al exterior. El agua del circuito secundario entra en el enfriador a elevada temperatura a los serpentines por la parte baja del enfriador (2) y lo abandona a baja temperatura por la parte superior (7) [11].

La diferencia entre el proceso A y B se puede observar en la carta psicrométrica de la figura 4.18 presentada a continuación.

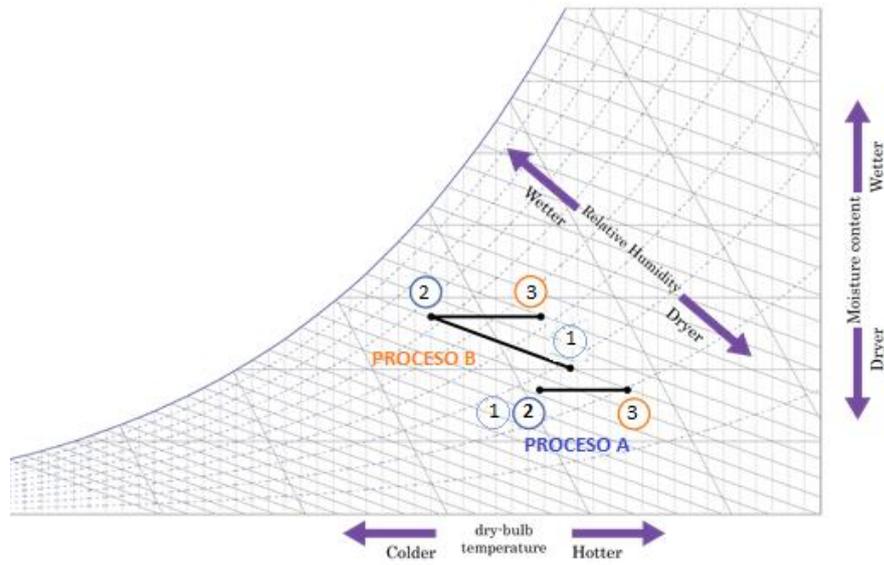


Figura 4.18 (fuente: <https://www.evapco.com>)

El flujo de aire en el proceso B, al haber aumentado previamente su humedad en los preenfriadores, disminuye su temperatura y, por lo tanto, tiene más capacidad de refrigeración que el aire en condiciones ambientales del proceso A.

CAPÍTULO 5:
**ESTUDIO JUSTIFICATIVO DEL AHORRO ECONÓMICO
DE ACUMULACIÓN DE FRÍO MEDIANTE MATERIALES
DE CAMBIO DE FASE**

5. ESTUDIO JUSTIFICATIVO DEL AHORRO ECONÓMICO DE ACUMULACIÓN DE FRÍO MEDIANTE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

En este apartado se presentan los cálculos económicos que respaldan el proyecto de implantación de un sistema de acumulación de frío en el edificio de las Cortes de Castilla y León. El depósito de PCM encargado de esta función está tomado del modelo presentado por Carrier United Technologies en 2017 [3] y actualizado como se describe en la sección 5.1.4, subapartado 2, pág. 92.

Para la obtención del coste en la producción de frío tanto nocturno (con depósito) como diurno (sin depósito), se deben obtener los siguientes datos:

- La capacidad acumulativa y el tiempo de funcionamiento del depósito de PCM.
- El consumo eléctrico de la bomba asociada a la enfriadora.
- El consumo eléctrico de la bomba asociada al depósito de PCM.
- El consumo eléctrico de la bomba asociada al enfriador adiabático.
- El consumo eléctrico del sistema de producción de frío (enfriadora (WCC) + enfriador adiabático (AWCC)).

Se deben traducir estas variables a lenguaje económico a fin de calcular el ahorro, para lo cual son necesarias las diferentes tarifas eléctricas determinadas por la compañía.

La demanda de frío del edificio depende del momento del día y de la actividad que se desarrolle en este. Para simplificar los cálculos, se han estudiado dos supuestos:

- Primer supuesto: parte de la hipótesis de que la demanda de frío es la misma en todas las horas e igual a la máxima potencia de refrigeración de la enfriadora disponible: 865 kW. Este estudio mostrará el ahorro económico anual.
- Segundo supuesto: se trata de una muestra de la influencia de la variación de la demanda a lo largo de una jornada en el ahorro económico. En este caso, se trabaja con una demanda no constante que permite hacer un estudio más próximo al resultado real de un método de acumulación de frío nocturno. Este estudio se realizará únicamente en un mes

5.1. Supuesto 1: ahorro económico anual con un depósito de PCM y demanda de frío máxima y constante

Como se ha explicado anteriormente, en este caso se supondrá que durante todas las horas que esté funcionando el sistema de refrigeración (tanto en producción nocturna como en producción diurna), que este debe abastecer la demanda de frío con 865 kW cada hora, es decir, la máxima potencia que es capaz de proporcionar.

5.1.1. Paso 1.1: definir el depósito de PCM y la bomba necesaria

1) Selección de un depósito de materiales de cambio de fase

Con este depósito, se pretende acumular el frío producido en el rango temporal en el que se tenga la mínima tasa de €/kWh de electricidad. La cantidad de frío que se puede acumular depende de la capacidad de almacenamiento del depósito. Partiendo del dato de la producción de frío del sistema de refrigeración, 865 kW, se obtienen cuántas horas son necesarias para que el depósito, almacenando la energía recibida de esta, llegue al máximo de su capacidad.

a. Capacidad de almacenamiento en (kWh/m³) y tiempo máximo de funcionamiento con demanda de frío máxima y constante

i. Cálculo de la capacidad de almacenamiento de energía de refrigeración del depósito:

Considerando, que el depósito puede almacenar 60 kWh/m³ (de acuerdo con la ficha técnica de este [3]) se realiza el cálculo de los kWh de frío que puede almacenar teniendo en cuenta las medidas máximas que podría tener acorde con el espacio disponible:

Donde, en el depósito seleccionado:

- D = 2,7 m
- L = 6,4 m
- H = 3,25 m

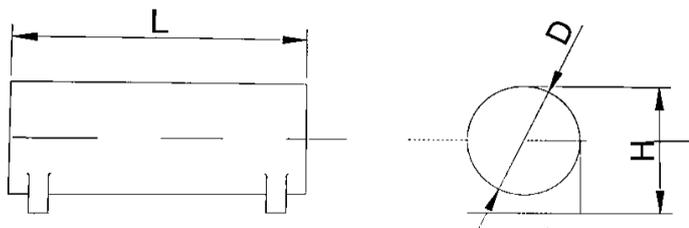


Figura 5.1 (Medidas depósito de PCM)

Se realiza el cálculo numérico:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot L = \pi \cdot \left(\frac{2,7}{2}\right)^2 \cdot 6,4 = 36,6 \text{ m}^3 \quad (\text{ec. 5.1})$$

$$\xrightarrow{60 \text{ kWh/m}^3 [3]} V \cdot 60 = 2220 \text{ kWh} \quad (\text{ec. 5.2})$$

Este resultado muestra la capacidad real que tiene un depósito de estas dimensiones y de acuerdo con los supuestos anteriores.

ii. Cálculo del tiempo máximo de funcionamiento acumulativo del depósito:

Es el periodo de tiempo durante el cual puede estar acumulando kWh de frío hasta llegar al límite de su capacidad:

$$t_{\text{máx}} = \frac{2220 \text{ kWh}}{865 \text{ kWh/h}} = 3 \text{ h} \quad (\text{ec. 5.3})$$

Este resultado indica la imposibilidad de abastecimiento de energía durante un periodo superior a 3 h, ya que es el tiempo necesario para llegar a la máxima capacidad de almacenamiento del depósito.

2) Selección de la bomba del depósito de materiales de cambio de fase

Es necesario la selección de una bomba para la entrada del depósito de PCM que sea capaz de impulsar el agua de refrigeración por este. Para ello, se necesita saber el caudal que circula por ella y la altura de impulsión.

a. Cálculo del caudal de la bomba:

El caudal de la bomba del depósito es el mismo que el que circula por la enfriadora. Por consiguiente, sabiendo que la enfriadora transmite al fluido (agua) 865 kW de potencia de frío, se puede hallar el caudal que circula por ambas mediante la potencia frigorífica del agua, ya que [4]:

$$P_f = \rho \cdot \dot{Q} \cdot c \cdot |\Delta T| \quad (\text{ec. 5.4})$$

Donde:

- P_f [kW]: potencia frigorífica del agua (en este caso 865 kW).
- ρ [kg/m³]: densidad del agua (se han tomado 1000 kg/m³).
- \dot{Q} [m³/s]: caudal de la bomba (lo que se desea calcular).
- c [kJ/(kg K)]: calor específico del agua (se han tomado 4,18 kJ/(kg K)).

- ΔT [K] o [°C]: diferencia de temperaturas del agua entre la entrada (12°C) y salida (7°C) de la enfriadora en valor absoluto, ya que, al ser una potencia de frío, esta diferencia es negativa.

Teniendo en cuenta las variables anteriores, se obtiene que:

$$\dot{Q} = \frac{P_f}{\rho \cdot C \cdot \Delta T} = 0,042 \text{ m}^3/\text{s} = 151,2 \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{ec. 5.5})$$

Este es el caudal que debe circular por la bomba a la entrada del depósito y por el propio depósito. Además, debe ser igual al de todo el sistema de producción de frío, incluyendo las correspondientes bombas a la entrada de los elementos de este.

b. Cálculo de la altura equivalente a la pérdida de carga en el depósito de PCM

Se debe hallar la altura equivalente a la pérdida de presión derivada del paso del fluido (agua) por el depósito.

Según los datos técnicos del depósito [3], se indica que tiene una pérdida de carga máxima de 24,5 kPa. que es la que tendrá que salvar la bomba escogida. Utilizando la ecuación general de la energía de un fluido [4]:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (\text{ec.5.6})$$

Donde:

- P_1 y P_2 [Pa]: son las presiones del fluido a la entrada y salida del depósito respectivamente. Su diferencia equivale a la pérdida de carga en el depósito (en este caso 24,5 kPa).
- v_1 y v_2 [m/s]: son las velocidades del fluido a la entrada y a la salida del depósito. Se toma la hipótesis de que estas son iguales.
- h_1 y h_2 [m]: son los términos de altura. Su diferencia es la altura equivalente que se desea hallar.

Despejando la diferencia de alturas y aplicando las hipótesis anteriores, se obtiene que:

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g} = 2,5 \text{ m} \quad (\text{ec. 5.7})$$

Que es la altura equivalente a las pérdidas producidas en el depósito.

Una vez obtenidos estos datos, y teniendo en cuenta la aplicación para la que va a ser empleada (circuito primario de sistema de refrigeración), se procede a la selección de una bomba real (ver fig. 5.2).



Figura 5.2 [37]

Se ha escogido una bomba de la marca Grundfos, modelo TPE 200-70/4 A-F-A-BAQE [37] que incluye variador de frecuencia.

5.1.2. Paso 1.2: cálculo de las potencias eléctricas consumidas y de su coste económico en producción de frío nocturna con un depósito de PCM y demanda de frío máxima y constante

Este apartado está destinado a calcular el coste que supone la utilización de un depósito de PCM de las características descritas en el Paso 1.1. Este se pretende comparar posteriormente con el importe económico cuando no se dispone de un sistema de almacenamiento de frío.

1) Cálculo de los kWh eléctricos diarios consumidos con un depósito de PCM y demanda de frío máxima y constante

Dado que las tarifas económicas de las compañías eléctricas se refieren a kWh eléctricos, es necesario traducir los resultados de potencias obtenidos en el Paso 1.1 a consumo eléctrico. La potencia eléctrica total será la suma de:

- Potencia eléctrica consumida por el sistema de refrigeración (enfriadora + enfriador adiabático).

- Potencia eléctrica consumida por la bomba del depósito de PCM.
- Potencia eléctrica consumida por la bomba del enfriador adiabático [12].
- Potencia eléctrica consumida por la bomba de la enfriadora [12].

a. Cálculo de la potencia eléctrica consumida por el sistema de refrigeración

El coeficiente de eficiencia energética de todo el sistema de frío (COP) se puede tomar como 3,7 según datos técnicos de la instalación [11]. Se obtiene entonces, conociendo este dato y sabiendo la potencia de frío que se produce, la potencia eléctrica que consume la enfriadora a la hora [5]:

$$COP = \frac{\text{Potencia frigorífica producida [kW]}}{\text{potencia eléctrica consumida [kW]}} = \frac{865}{P_e} = 3,7 \quad (\text{ec. 5.8})$$

Por lo tanto:

$$P_e = \frac{865}{3,7} = 233,8 \text{ kW} \quad (\text{ec. 5.9})$$

La potencia eléctrica consumida por la máquina frigorífica es de 233,8 kW.

b. Potencia eléctrica consumida por la bomba del depósito

La bomba seleccionada de marca Grundfos (TPE 200-70/4 A-F-A-BAQE), debe tener incorporado un variador de frecuencia que adapte la curva de la bomba al punto de trabajo necesario para esta aplicación. Esto queda justificado con la curva de la bomba en la figura 5.3.

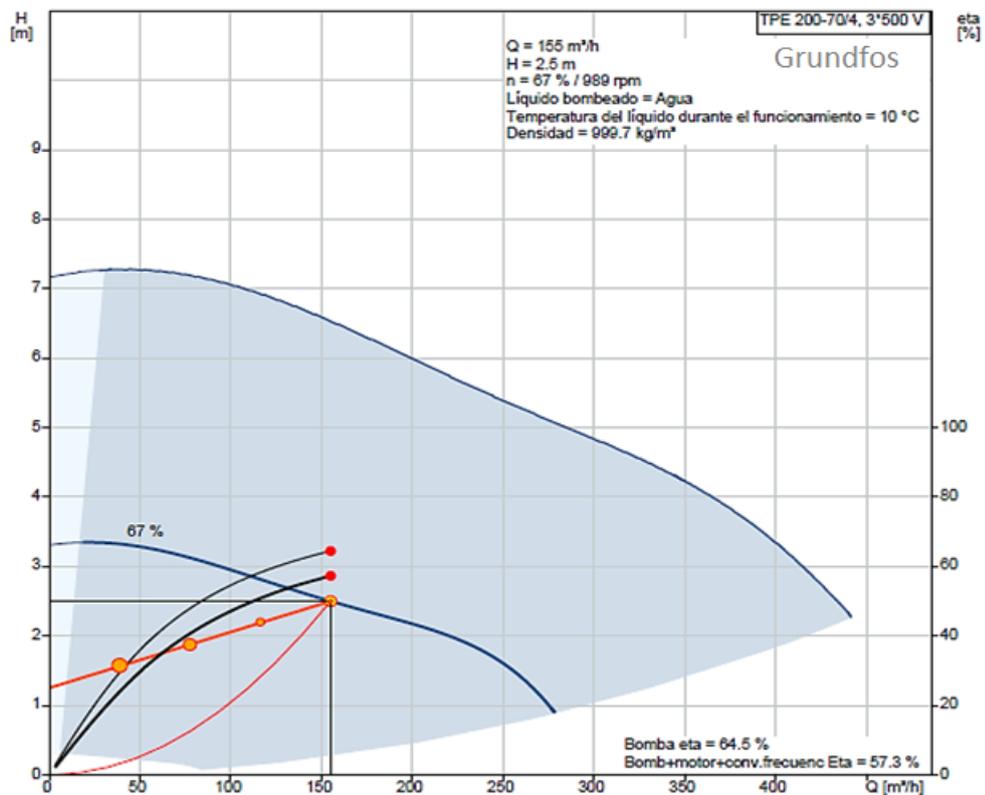


Figura 5.3 [37]

Según la ficha técnica de este modelo, la potencia eléctrica es de 5,5 kW [37].

c. Cálculo de la potencia eléctrica total consumida

Los datos de la potencia eléctrica de la bomba de la enfriadora y de la bomba del enfriador adiabático han sido obtenidos de la ficha técnica de cada una de ellas [12]. Las potencias eléctricas de los diferentes elementos se recogen en la tabla 5.1:

Elementos	kW eléctricos
Bomba de la enfriadora	50,0
Sistema de refrigeración (WCC + enfriador adiabático)	233,8
Bomba del enfriador adiabático	53,2
Bomba del depósito de PCM	5,5
TOTAL	343

Tabla 5.1

Por lo tanto, para realizar todos los cálculos de costes se debe trabajar con la cifra de 343 kW eléctricos consumidos cada hora.

2) Cálculo del coste económico referente a los kWh eléctricos diarios consumidos con un depósito de PCM y demanda de frío máxima y constante

a. Coste debido solo al consumo de potencia eléctrica

Una vez obtenido el consumo total de potencia eléctrica por hora con el nuevo sistema, se debe utilizar este dato para hallar el coste económico anual. Conviene recordar la idea principal sobre la que gira el proyecto: la ventaja del almacenamiento de energía (frío) en un depósito que permita que la producción de esta se realice en horario nocturno.

Al efectuar un consumo en media tensión, se utiliza la tarifa 6.1 [1], que divide las horas del día en 6 periodos horarios, desde P1 (tarifa más elevada) a P6 (tarifa más baja), tal y como se indica en la tabla 5.2. Existen otras tarifas en media tensión que dividen el consumo en otros periodos diferentes, esto depende de la potencia contratada; en el caso de este edificio de sector terciario, es de 750 kW.

DENOMINACIÓN	TARIFA.ENERGÉTICA [cént. €/kWh]
P1	12,31080
P2	10,99820
P3	10,16440
P4	9,28330
P5	8,61600
P6	7,79190

Tabla 5.2

Cabe destacar que P6 es la tarifa correspondiente al horario nocturno, que abarca desde las 00:00 hasta las 8:00 a.m. (excepto en el caso del mes de agosto, donde esta tarifa, P6, abarca las 24 h).

El cálculo se realizará para 3 h (de 00:00 a 3:00), ya que es el tiempo que tarda el depósito en alcanzar su máxima capacidad de almacenamiento de potencia de frío (ya explicado en el Paso 1.1: “Selección de un depósito de materiales de cambio de fase”).

A continuación, se presenta en la siguiente tabla 5.3 un ejemplo del cálculo diario con tarifa P6 de acumulación de frío durante 3 h nocturnas.

Coste diario de acumulación de frío con la tarifa más baja

Horario: 00:00 – 03:00	kW	Cent. €/kWh	€/día
3 h	343	7,7919	80,18

Tabla 5.3

A esta cifra se le deben añadir los diferentes impuestos, así como los costes complementarios derivados del término de potencia y del alquiler a la compañía eléctrica del equipo de medida.

b. Coste del término de potencia

El término de potencia se define como: “la cantidad fija que se paga en cada período de facturación, en función de la potencia contratada, por el hecho de poder disponer de dicha potencia cuando se desee” [45].

En el caso concreto estudiado, la potencia contratada es de 750 kW, que supone un coste anual de 75 788,154 €. Se pretende hacer una asignación de este gasto a cada kWh consumido, es decir, una repartición de este entre el total de kWh eléctricos necesarios en un año (en este caso 1,4 GWh) [11]. Al resultado de esta operación se le llamará término de potencia por kilovatio consumido (TP_{kW})

$$TP_{kW} = \frac{\text{Coste de la potencia contratada}}{\text{Consumo eléctrico anual}} = \frac{75\,788,154\ \text{€}}{1,4 \cdot 10^6\ \text{kWh}} = 0,054\ \text{€/kWh}$$

(ec. 5.10)

Esto quiere decir que al importe del consumo eléctrico (depende de la tarifa), se le suma a mayores un gasto fijo de 0,54 € por kWh eléctrico empleado.

c. Alquiler de los equipos de medida

El alquiler del contador por parte de la compañía eléctrica también debe quedar reflejado en el coste económico total del consumo eléctrico. Es un complemento al precio del kWh eléctrico que se traduce en 900 € anuales. Como se quiere calcular el coste diario, se reparte entre los 365 días/año [12].

$$EM_{\text{día}} = \frac{\text{Coste anual}}{365 \text{ días/año}} = \frac{900}{365} = 2,47 \text{ €/día} \quad (\text{ec. 5.11})$$

Este gasto complementario es independiente de la tarifa de electricidad y de la potencia consumida.

d. Impuesto eléctrico

La base imponible del impuesto eléctrico es el resultado de multiplicar la suma del coste eléctrico diario, del coste del término de potencia y del alquiler de los equipos de medida por el factor 1,05113. Finalmente, a esta base se le aplica el porcentaje del 4,864% y se obtiene el importe que se debe abonar diariamente debido a este impuesto [1].

e. Impuesto sobre el valor añadido (IVA)

Se obtiene hallando el 21% de la suma de todos los costes ya calculados (incluido también el importe por el impuesto eléctrico) [1].

f. Coste total diario con depósito (después de impuestos)

A continuación, la tabla 5.4 presenta esquemáticamente los costes ya calculados y los diferentes impuestos considerados:

COSTE ECONÓMICO DIARIO CON UN DEPÓSITO DE PCM

COSTE DIARIO ELÉCTRICO (ANTES DE IMPUESTOS)		80,18 €
COSTE TÉRMINO DE POTENCIA/DÍA	$0,054 \text{ €/kWh} \cdot 343 \text{ kW} \cdot 3h$	55,57 €
ALQUILER EQUIPOS MEDIDA/DÍA		2,47 €
IMPUESTO ELÉCTRICO	$0,04864 \cdot (80,18 + 55,57 + 2,47) \cdot 1,05113$	7,07 €
IVA (21%)	$(80,18 + 23,69 + 2,47 + 5,87) \cdot 0,21$	30,51 €

COSTE TOTAL DIARIO: 175,78 €

Tabla 5.4

Así pues, se tiene que el coste total diario por la producción y almacenamiento de 3 h de frío es de 175,78 €. En este caso, el coste será igual para todos los meses, ya que la tarifa nocturna es invariable durante todo el año en horario y precio.

3) Cálculo del coste económico mensual y anual con un depósito de PCM y demanda de frío máxima y constante

El coste mensual dependerá de los días laborables en el mes [33]. Admitiendo que en todos los días del periodo estudiado (del 15 de abril hasta el 18 de octubre de 2019, ambos incluidos) se consume la misma cantidad de electricidad y recordando que la tarifa eléctrica nocturna es común para todos los meses, se obtiene coste eléctrico mensual.

Sumando los resultados obtenidos, se obtiene el coste eléctrico anual, tal y como se manifiesta en la siguiente tabla 5.5.

MES	DÍAS HÁBILES	COSTE ELÉCTRICO MENSUAL
ABRIL (2. ^a QUINCENA)	9	1.582,06 €
MAYO	22	3.867,27 €
JUNIO (1. ^a QUINCENA)	10	1.757,85 €
JUNIO (2. ^a QUINCENA)	10	1.757,85 €
JULIO	23	4.043,05 €
AGOSTO	21	3.691,48 €
SEPTIEMBRE	21	3.691,48 €
OCTUBRE (1. ^a QUINCENA)	9	1.582,06 €

COSTE TOTAL ANUAL: 21.973,10 €

Tabla 5.5

Por lo tanto, se puede concluir que, con las estimaciones realizadas, el gasto eléctrico anual con un depósito de almacenamiento de frío mediante materiales de cambio de fase es de 21 973,10 €. Se debe comparar esta cifra con el coste en estas mismas condiciones sin depósito de PCM y calcular el ahorro económico.

5.1.3. Paso 1.3: cálculo del coste económico en producción de frío diurna sin depósito de PCM y con demanda de frío máxima y constante

Se trata de comparar los resultados del Paso 1.2 con aquellos derivados del coste de producción de 3 h de frío en horario diurno, es decir, sin acumulación de frío, donde las tarifas de electricidad aumentan en comparación con el horario nocturno. La diferencia económica máxima entre estos dos periodos se encuentra en la segunda quincena de junio y en el mes de julio donde la tarifa más cara (de 11:00 a 19:00) es de 12,31 céntimos de euro por kWh eléctrico consumido frente a 7,79 céntimos durante la noche (de 00:00 a 8:00 a. m.).

1) Cálculo de los kWh eléctricos diarios consumidos sin depósito de PCM y demanda de frío máxima y constante

La potencia de frío producida por el sistema de refrigeración, al igual que en el caso anterior, será de 865 kW a la hora; el COP de este será el mismo: 3,7. Teniendo en cuenta eso, el cálculo es idéntico al ya mostrado en el Paso 1.2, apartado 1, subapartado a “Cálculo de la potencia eléctrica consumida por el sistema de refrigeración”, donde se indica que este consume 233,8 kW.

Se seguirá considerando, por lo tanto, que en la bomba de la enfriadora se emplean 50 kW eléctricos y 53,2 kW en la bomba del enfriador adiabático, ya que el caudal de agua que circula por estas es el mismo que en el caso anterior. La única diferencia con los elementos del cálculo con un depósito está en la bomba del depósito, ya que, al no tener sistema de almacenamiento en esta parte del estudio, esta desaparece.

A continuación, se muestra una tabla equivalente a la tabla 5.1 con los elementos que intervienen en esta parte del cálculo:

Elementos	kW eléctricos
Bomba de la enfriadora	50,0
Sistema de refrigeración (WCC + enfriador adiabático)	233,8
Bomba del enfriador adiabático	53,2
TOTAL	337

Tabla 5.6

La energía eléctrica consumida en 1 h es menor que en el caso anterior (337 kWh frente a 343 kWh), debido a que no existe la necesidad de una bomba que ponga en circulación al fluido por el interior del depósito de almacenamiento de frío. No obstante, esta diferencia no es significativa.

2) Cálculo del coste económico referente a los kWh eléctricos diarios consumidos sin depósito de PCM y demanda de frío máxima y constante

a. Coste debido solo al consumo de potencia eléctrica

El importe económico que se debe satisfacer por dos horas de funcionamiento de aire acondicionado depende, como se ha reiterado anteriormente, de la franja horaria de trabajo. En este caso, se ha escogido el intervalo entre las 11:00 y las 14:00, ya que estas horas se encuentran dentro del periodo donde la tarifa de electricidad es más elevada; de esta manera, se puede calcular la máxima diferencia de coste entre el periodo nocturno y el diurno (ver tabla 5.7). Así mismo, coincide con un periodo de actividad normal en el edificio de las Cortes de Castilla y León.

Conviene recordar el cuadro de tarifas mostrado en la tabla 5.2, ya que, a diferencia del caso nocturno, la tarifa con la que se va a trabajar (la más elevada) no coincide en todos los meses y, en algunos casos concretos, cambia incluso con la quincena. Como ejemplo se tiene el caso del mes de junio: mientras que, en la primera quincena, la tarifa más cara es la P3 y abarca desde las 9:00 hasta las 15:00; en la segunda, se encuentra la P1, que se extiende desde las 11:00 hasta las 19:00.

MES	kW	TARIFA	NÚMERO DE HORAS	€/DÍA (antes de impuestos)
Abril (2. ^a quincena)	337	P5	3	87,11 €
Mayo	337	P5	3	87,11 €
Junio (1. ^a quincena)	337	P3	3	102,76 €
Junio (2. ^a quincena)	337	P1	3	124,46 €
Julio	337	P1	3	124,46 €
Agosto	337	P6	3	78,78 €
Septiembre	337	P3	3	102,76 €
Octubre (1. ^a quincena)	337	P5	3	87,11 €

Tabla 5.7

Debido a esta falta de homogeneidad en los precios mensuales, se ha elaborado la tabla 5.7, la cual refleja el precio diario, antes de impuestos, de los kWh consumidos en cada mes concreto (desde la segunda quincena de abril hasta la primera de octubre).

b. Coste de los gastos complementarios

Al igual que en el apartado con almacenamiento de frío, a estas cantidades se les deben añadir una serie de complementos ya explicados en el Paso 1.2, apartado 2, subapartados b y c, los cuales se recogen en la siguiente tabla 5.8:

GASTOS COMPLEMENTARIOS SIN DEPÓSITO DE PCM

COSTE TÉRMINO DE POTENCIA/DÍA	$0,054 \text{ €/kWh} \cdot 337 \text{ kWh/h} \cdot 3h$	54,59 €
ALQUILER EQUIPOS MEDIDA/DÍA		2,47 €

COSTE TOTAL DIARIO DE GASTOS COMPLEMENTARIOS: 57,06 €

Tabla 5.8

Como se puede observar, el coste del término de potencia es ligeramente menor al obtenido en el paso anterior (tabla 5.4 pág. 84), debido a que se consume menor energía eléctrica. En cambio, el gasto por el alquiler de los equipos de medida coincide con el calculado sin depósito ya que no depende de la tarifa eléctrica ni de la electricidad consumida.

c. Coste total diario sin depósito y demanda de frío máxima y constante (después de impuestos)

Se debe hacer un cálculo de cada uno de los meses por separado ya que, aunque los gastos comunes son siempre los mismos, no así el coste de la electricidad, tal y como se ha visto en los apartados anteriores.

Se muestra seguidamente una tabla con todos los gastos y los correspondientes impuestos: el eléctrico y el IVA (ver tabla 5.9).

MES	TIPO DE COSTE	IMPORTE	COSTE DIARIO
ABRIL (2. ^a QUINCENA)	coste electricidad	87,11 €	183,36 €
	Gastos complementarios	15,68	
	Impuesto eléctrico	7,37 €	
	IVA (21 %)	31,82 €	
MAYO	coste electricidad	87,11 €	183,36 €
	Gastos complementarios	15,68	
	Impuesto eléctrico	7,37 €	
	IVA (21 %)	31,82 €	
JUNIO (1. ^a QUINCENA)	coste electricidad	102,76 €	203,27 €
	Gastos complementarios	15,68	
	Impuesto eléctrico	8,17 €	
	IVA (21 %)	35,28 €	
JUNIO (2. ^a QUINCENA)	coste electricidad	124,46 €	230,87 €
	Gastos complementarios	15,68	
	Impuesto eléctrico	9,28 €	
	IVA (21 %)	40,07 €	
JULIO	coste electricidad	124,46 €	230,87 €
	Gastos complementarios	15,68	
	Impuesto eléctrico	9,28 €	
	IVA (21 %)	40,07 €	
AGOSTO	coste electricidad	78,78 €	172,76 €
	Gastos complementarios	15,68	
	Impuesto eléctrico	6,94 €	
	IVA (21 %)	29,98 €	
SEPTIEMBRE	coste electricidad	102,76 €	203,27 €
	Gastos complementarios	15,68	
	Impuesto eléctrico	8,17 €	
	IVA (21 %)	35,28 €	
OCTUBRE (1. ^a QUINCENA)	coste electricidad	87,11 €	183,36 €
	Gastos complementarios	15,68	
	Impuesto eléctrico	7,37 €	
	IVA (21 %)	35,28 €	

Tabla 5.9

3) Cálculo del coste económico mensual y anual sin depósito de PCM y demanda de frío máxima y constante

Al igual que en el cálculo con almacenamiento de frío, calculamos primero el gasto mensual sabiendo los días hábiles de cada mes para, posteriormente, saber el coste anual. Los días hábiles serán los mismos que en la tabla 5.10.

MES	DÍAS HÁBILES	COSTE ELÉCTRICO MENSUAL
ABRIL (2. ^a QUINCENA)	9	1.650,25 €
MAYO	22	4.033,95 €
JUNIO (1. ^a QUINCENA)	10	2.032,72 €
JUNIO (2. ^a QUINCENA)	10	2.308,71 €
JULIO	23	5.310,04 €
AGOSTO	21	3.628,06 €
SEPTIEMBRE	21	4.268,70 €
OCTUBRE (1. ^a QUINCENA)	9	1.650,25 €

COSTE TOTAL ANUAL: 24.882,68 €

Tabla 5.10

5.1.4. Paso 1.4: cálculo del ahorro económico y amortización del sistema de almacenamiento de frío con una demanda máxima y constante

1) Ahorro económico

Si se comparan los costes totales anuales de la producción de frío durante 3 h con depósito de PCM (ver tabla 5.5 pág. 85) y sin depósito (ver tabla 5.10 pág. 91), se puede observar que el coste es mayor cuando el frío se produce por el día, sin posibilidad de almacenamiento.

Por lo tanto, el ahorro energético anual es el siguiente:

$$AHORRO = COSTE\ TOT.\ SIN\ DEPÓS. - COSTE\ TOT.\ CON\ DEPÓS. \quad (\text{ec. } 5.12)$$

Sustituyendo los parámetros anteriores:

$$AHORRO = 24\ 882,68\ \text{€/año} - 21\ 973,10\ \text{€/año} = \mathbf{2\ 909,58\ \text{€/año}}$$

La implantación del método de almacenamiento de frío supondría un ahorro de 2 909,58 €/año suponiendo que el sistema de refrigeración trabaja durante las horas estudiadas a máxima potencia (865 kW). Esto quiere decir que con acumulación de frío nocturna se obtiene un ahorro anual medio del 11,7% con respecto a la producción de frío sin acumulación.

2) Amortización del depósito de PCM y de la bomba de impulsión

Para la obtención de un modelo del depósito de PCM, se ha contactado con la colaboración de la multinacional líder de sistemas de almacenamiento de energía térmica, Carrier United Technologies, al objeto de que este trabajo se acerque a condiciones reales de mercado.

El sistema que se propone se muestra en la figura 5.4:

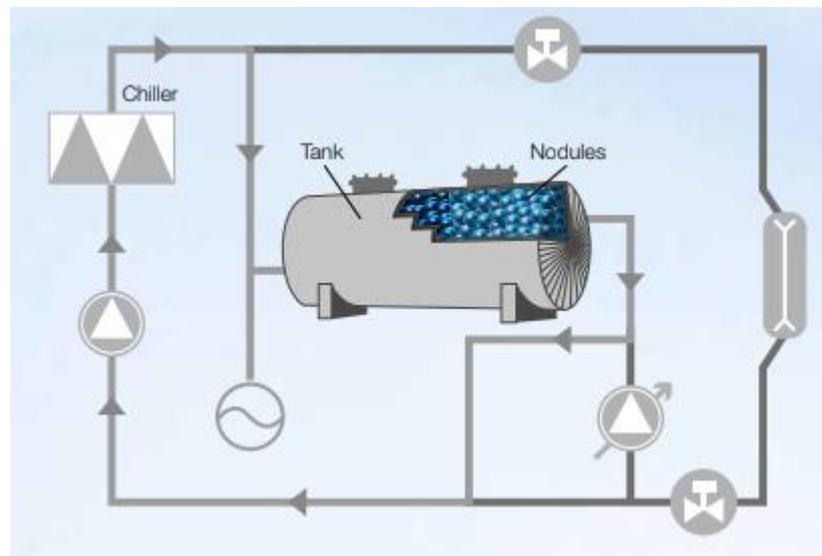


Figura 5.4 [3]

En dicha figura se puede observar un depósito cilíndrico, que según el presupuesto QUOTATION-STL-AC.0024 (de fecha 9 de julio de 2019) tiene un volumen de 24 m³ en cuyo interior se alojan PCM empaquetados en 600 bolsas de 22 kg cada una colocadas en 12 plataformas de 120 x130 x 175 cm, con un peso total de 14 toneladas.

Los 24 m³ de módulos AC.00 arrojan un coste de 24 800 € y el depósito de acero, en el que dichos módulos se alojan, supone un coste de 20 610 €. Con lo cual, se puede considerar que son 45 410 € lo que supone la incorporación de un depósito de almacenamiento de frío del volumen y características proporcionadas por Carrier.

Debido a que en este apartado se ha dimensionado el depósito de acuerdo con el espacio disponible y no con la demanda de frío (como se haría en un caso real), existe diferencia entre el volumen del depósito calculado para este apartado (36,6 m³) y el volumen del depósito determinado por Carrier (24 m³).

Por esta razón, sobre la base del precio de Carrier para un depósito de 24m³ (45 410 €), se calculará un precio proporcional para un depósito de 36,6 m³.

$$\frac{45\,410\text{€}}{24\text{ m}^3} = \frac{\text{Precio para el depósito del supuesto 1 (36,6 m}^3)}{36,6\text{ m}^3} \rightarrow \text{Precio} = 69\,250\text{ €}$$

(ec. 5.13)

A este precio es necesario sumar el de la bomba de impulsión del depósito de 5,5 kW de potencia nominal de la marca Grundfos (referenciada en la sección 5.1.1., apartado 2, subapartado b, pág.79), necesaria para el funcionamiento del sistema de almacenamiento, cuyo coste se estima aproximadamente en 9 000 € [37]. Esto deja la inversión inicial teórica necesaria en 78 250 €.

Basándose en la hipótesis de que las vidas útiles del depósito de PCM y de la bomba son iguales a 30 años y calculando el periodo de amortización, se determinará si la instalación en las condiciones más desfavorables (supuesto 1: demanda máxima y constante en todas las horas) es rentable o no.

$$\begin{aligned} \text{Periodo de amortización} &= \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{ahorro anual (ver Paso 1.4, subapartado 1)}} = \\ &= \frac{78\,250\text{ €}}{2\,909,58\text{ €/año}} = 26,89\text{ años (ec. 5.14)} \end{aligned}$$

Se debe tener en cuenta que este resultado se deriva del planteamiento de unas condiciones extremas y que, como se demostrará en el supuesto 2, estas proporcionan el mínimo ahorro posible. Aun habiendo trabajado con estas condiciones, el sistema sale amortizable, por lo tanto, con una demanda real (más cercana a la tratada en el supuesto 2), el periodo de amortización será menor y la rentabilidad del sistema aumentará (ver apartado 5.2.4).

5.2. Supuesto 2: ahorro económico mensual con un depósito de PCM y demanda de refrigeración variable (en función del horario)

5.1.1. Paso 1.2: definición y simplificación de la demanda real de un día de verano

En este supuesto, se trabajará con una demanda de frío real obtenida del 18 de junio de 2018 (según datos recogidos en la instalación). Se utilizarán, por consiguiente, los datos proporcionados por el programa de gestión de la instalación de marca Siemens. Este usa captadores, equipos, actuadores y relés, controlados por un software que proporciona información sobre las variables del sistema de climatización en periodos de entre 5 y 10 min, entre ellas, la demanda de frío [12].

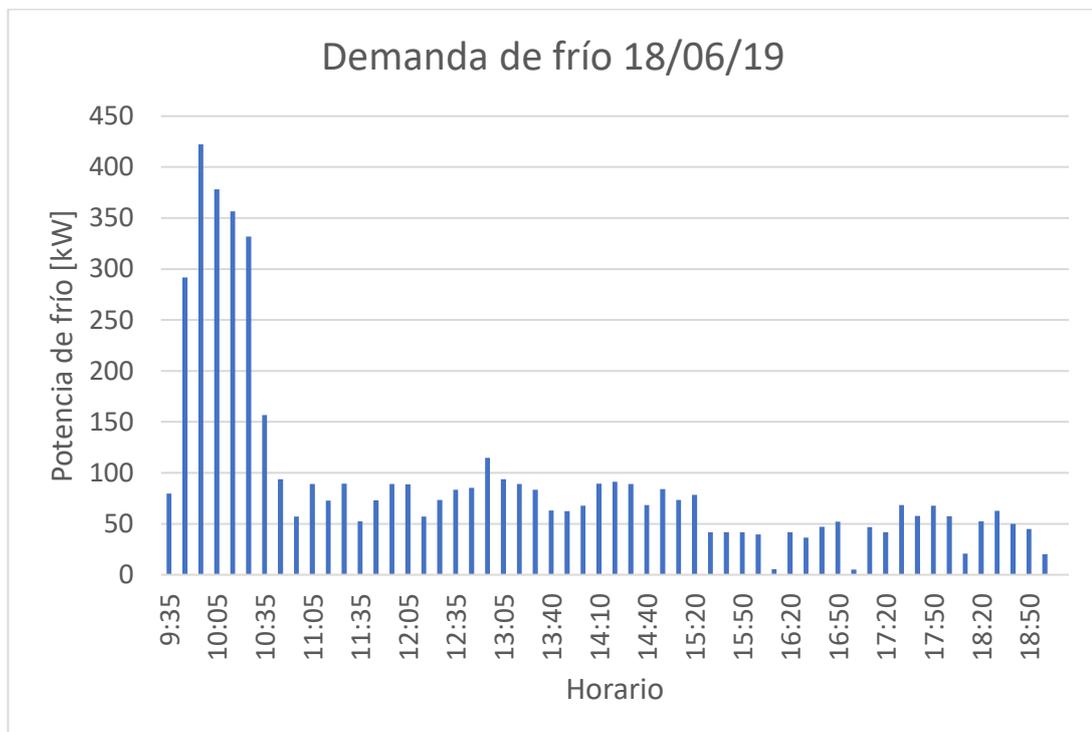


Figura 5.5

En la figura 5.5 se puede observar un gráfico que muestra la demanda de frío por periodos de tiempo del 18 de junio de 2019.

Se observa un gran pico de potencia que se da en el momento del arranque del sistema de refrigeración (400 kW de potencia aprox.). El siguiente máximo de demanda se produce en las horas centrales del día, en torno a las 13:00 (unos 120 kW) debido al aumento de temperatura exterior.

La simplificación de estos datos se encuentra en la tabla 5.11, donde se ha cogido el máximo de potencia de cada hora de funcionamiento (columna denominada “Demanda real”), desde las 9:00 h hasta las 19:00 h. Para realizar los cálculos con datos más extremos (suponiendo un día muy caloroso), se ha multiplicado la demanda de cada hora por el factor 1,35. En la tabla 5.11 es la denominada “Demanda maximizada”.

Horario	Demanda real [kW]	Factor	Demanda maximizada [kW]
9:00-10:00	422	1,35	570,24
10:00-11:00	378		510,44
11:00-12:00	89		120,42
12:00-13:00	115		154,71
13:00-14:00	94		126,63
14:00-15:00	89		120,02
15:00-16:00	78		105,71
16:00-17:00	47		63,59
17:00-18:00	68		91,67
18:00-19:00	63		84,65
DEMANDA DIARIA MAXIMIZADA:			1 948,05 kW

Tabla 5.11

Se debe encontrar un depósito capaz de acumular 1 948 kW en periodo nocturno con objetivo de cubrir completamente la demanda de frío diurna. Es decir, se busca cubrir la demanda de las 10 horas de funcionamiento, no solo en las horas de tarifa pico, como se veía en el supuesto anterior.

5.2.1. Paso 2.1: definir el depósito de PCM para una demanda variable

- 1) Capacidad de almacenamiento en (kWh/m³) y tiempo máximo de funcionamiento para una demanda variable
 - a. Cálculo de la capacidad de almacenamiento de potencia de refrigeración del depósito:

Las mínimas medidas del depósito que proporcionan una cobertura de la demanda vienen expresadas en la figura 5.6.

- $D = 2,7 \text{ m}$
- $L = 5,8 \text{ m}$
- $H = 3,25 \text{ m}$

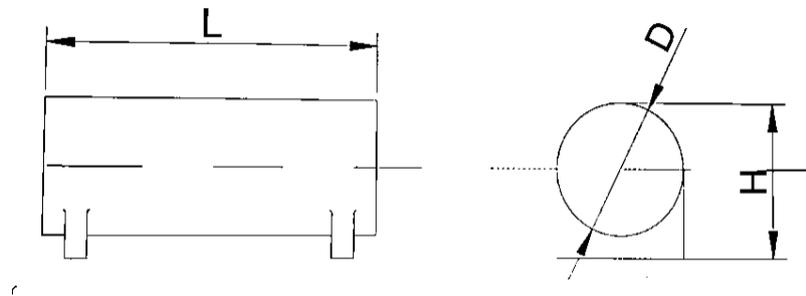


Figura 5.6

Como en el supuesto anterior, se realiza el cálculo numérico:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot L = \pi \cdot \left(\frac{2,7}{2}\right)^2 \cdot 5,8 = 33 \text{ m}^3 \quad (\text{ec. 5.15})$$

$$\xrightarrow{60 \text{ kWh/m}^3 [3]} V \cdot 60 = 1980 \text{ kWh} \quad (\text{ec. 5.16})$$

Por lo tanto, este es el tamaño mínimo del depósito que garantiza una cobertura de la demanda total durante la jornada laboral. Se puede observar que, con una demanda más cercana a la real, el tamaño del depósito se aproxima más al determinado por Carrier (24 m^3).

b. Cálculo del tiempo máximo de funcionamiento acumulativo del depósito

Durante el tiempo de carga, el sistema de refrigeración estará trabajando al máximo de potencia hasta completar la capacidad acumulativa del depósito, que resulta ser de 2 horas.

$$t_{\text{máx}} = \frac{1980 \text{ kWh}}{865 \text{ kWh/h}} = 2 \text{ h} \quad (\text{ec. 5.17})$$

En este caso, el resultado indica la imposibilidad de abastecimiento de energía durante un periodo superior a 2 h, ya que es el tiempo necesario para llegar a la máxima capacidad de almacenamiento del depósito.

5.2.2. Paso 2.2: cálculo de las potencias eléctricas consumidas y de su coste económico en producción de frío nocturna con un depósito de PCM y demanda variable

1) Cálculo de los kWh eléctricos diarios consumidos con un depósito de PCM y demanda variable

La potencia eléctrica total será la suma de:

- Potencia eléctrica consumida por el sistema de refrigeración (enfriadora + enfriador adiabático).
- Potencia eléctrica consumida por la bomba del depósito de PCM.
- Potencia eléctrica consumida por la bomba del enfriador adiabático [12].
- Potencia eléctrica consumida por la bomba de la enfriadora [12].

Las potencias serán iguales que en el supuesto anterior, ya que estas no dependen del depósito utilizado (ver tabla 5.1).

2) Cálculo del coste económico referente a los kWh eléctricos diarios consumidos con un depósito de PCM y demanda variable:

a. Coste debido solo al consumo de potencia eléctrica:

Como en el caso anterior, se presenta en la tabla 5.12 el gasto total diario por 2 h de acumulación nocturna.

Coste diario de acumulación de frío con la tarifa más baja

Horario: 00:00 – 02:00	kW	Cent. €/kWh	€/día
2 h	343	7,7919	53,45

Tabla 5.12

Añadiendo los diferentes impuestos explicados en el supuesto anterior:

COSTE ECONÓMICO DIARIO CON UN DEPÓSITO DE PCM

COSTE DIARIO ELÉCTRICO (ANTES DE IMPUESTOS)		53,45 €
COSTE TÉRMINO DE POTENCIA/DÍA	$0,054 \text{ €/kWh} \cdot 343 \text{ kW} \cdot 2\text{h}$	37,04 €
ALQUILER EQUIPOS MEDIDA/DÍA		2,47 €
IMPUESTO ELÉCTRICO	$0,04864 \cdot (53,45 + 37,05 + 2,47) \cdot 1,05113$	4,75 €
IVA (21%)	$(53,45 + 37,04 + 2,47 + 4,75) \cdot 0,21$	20,52 €

COSTE TOTAL DIARIO: 118,24 €

Tabla 5.13

Así pues, se tiene que el coste total diario por la producción y almacenamiento de 2 h de frío es de 118, 24 €.

3) Cálculo del coste económico para el mes de julio con un depósito de PCM y demanda variable

Suponiendo que la demanda maximizada (ver tabla 5.11) corresponde a un día del mes de julio, se tiene en la siguiente tabla el gasto total mensual por la acumulación de frío diaria durante 2 h nocturnas:

MES	DÍAS HÁBILES	COSTE ELÉCTRICO MENSUAL
JULIO	23	2 719,41 €

Tabla 5.14

5.2.3. Paso 2.3: cálculo de las potencias eléctricas consumidas y de su coste económico en producción de frío diurna sin un depósito de PCM y demanda variable

1) Cálculo de los kWh eléctricos diarios consumidos sin depósito de PCM y con demanda variable

La demanda maximizada obtenida en la tabla 5.11 se debe traducir a potencia eléctrica utilizando COP =3,7. A esta potencia eléctrica se le deben sumar las potencias eléctricas de la bomba de la enfriadora y de la bomba del enfriador adiabático (en la tabla 5.15 “Consumo eléctrico total”).

Horario	Demanda maximizada [kW]	Consumo eléctrico [kW]	Consumo eléctrico total [kW]
9:00-10:00	570,24	154,12	257,32
10:00-11:00	510,44	137,96	241,16
11:00-12:00	120,42	32,55	135,75
12:00-13:00	154,71	41,81	145,01
13:00-14:00	126,63	34,22	137,42
14:00-15:00	120,02	32,44	135,64
15:00-16:00	105,71	28,57	131,77
16:00-17:00	63,59	17,19	120,39
17:00-18:00	91,67	24,77	127,97
18:00-19:00	84,65	22,88	126,08

CONSUMO ELÉCTRICO TOTAL DIARIO: 1558,52 kW

Tabla 5.15

2) Cálculo del coste económico referente a los kWh eléctricos diarios consumidos sin depósito de PCM y con demanda variable

Introduciendo los datos anteriores en el Excel que contiene las tarifas por horas se obtiene (ver tabla 5.16)

Horario	Consumo eléctrico total [kW]	Tarifa	Importe [€]
9:00-10:00	257,32	P2	28,30
10:00-11:00	241,16	P2	26,52
11:00-12:00	135,75	P1	16,71
12:00-13:00	145,01	P1	17,85
13:00-14:00	137,42	P1	16,92
14:00-15:00	135,64	P1	16,70
15:00-16:00	131,77	P1	16,22
16:00-17:00	120,39	P1	14,82
17:00-18:00	127,97	P1	15,75
18:00-19:00	126,08	P1	15,52
COSTE TOTAL ANTES DE IMPUESTOS:			185,32 €

Tabla 5.16

Donde el gasto económico por la producción de agua de refrigeración para cubrir las necesidades de frío a lo largo de la jornada viene dado en la tabla 5.17.

COSTE ECONÓMICO DIARIO CON UN DEPÓSITO DE PCM

COSTE DIARIO ELÉCTRICO (ANTES DE IMPUESTOS)		185,32 €
COSTE TÉRMINO DE POTENCIA/DÍA	$0,054 \text{ €/kWh} \cdot 1558,51$	84,16 €
ALQUILER EQUIPOS MEDIDA/DÍA		2,47 €
IMPUESTO ELÉCTRICO	$0,04864 \cdot (185,32 + 84,16 + 2,47) \cdot 1,05113$	13,90 €
IVA (21%)	$(185,32 + 84,16 + 2,47 + 13,90) \cdot 0,21$	60,03 €

COSTE TOTAL DIARIO: 345,88 €

Tabla 5.17

En esta ocasión, el gasto mensual para satisfacer esta necesidad de frío en el mes de julio produciendo el frío en el horario de demanda es de 345,88 €.

3) Cálculo del coste económico mensual sin depósito de PCM y demanda variable

Al igual que en el cálculo con almacenamiento de frío, calculamos primero el gasto mensual sabiendo los días hábiles de cada mes para, posteriormente, saber el coste anual. Los días hábiles serán los mismos que en la anterior tabla 5.10.

MES	DÍAS HÁBILES	COSTE ELÉCTRICO MENSUAL
JULIO	23	7 955,24 €

Tabla 5.18

5.2.4. Paso 2.4: cálculo del ahorro económico con una demanda variable y comparativa con el de una demanda constante. Amortización del depósito de PCM

1) Ahorro económico y comparativa entre supuesto 1 y supuesto 2

Como no se ha hecho un estudio anual, se analizará únicamente el ahorro en el mes de julio con una demanda variable (supuesto 2) y, posteriormente, se comparará con el ahorro económico en el mes de julio con una demanda máxima constante (supuesto 1).

Por lo tanto, el ahorro energético anual es el siguiente:

$$AHORRO = COSTE MES JULIO. SIN DEPÓS. - COSTE MES JULIO. CON DEPÓS.$$

(ec. 5.18)

Sustituyendo los parámetros anteriores:

$$AHORRO = 7\,955,24 \text{ €/mes} - 2\,719,41 \text{ €/mes} = 5\,235,83 \text{ €/mes}$$

Este resultado supone un ahorro anual medio del 65,82% frente a la situación que no posee acumulación de frío.

La siguiente tabla 5.19, presenta la comparación con el ahorro en el mes de julio entre el supuesto 1 (demanda constante y máxima), 1 266,99 €, y el supuesto 2 (demanda variable), 5 235,83 €. En el primer caso el coste con depósito es de 4 043,05 € (tabla 5.5, pág. 85), que contrasta con el coste de 2 719,41 € del segundo supuesto (tabla 5.14, pág. 98). Mientras que, cuando se considera el coste sin depósito, las cifras correspondientes son 5 310,04 € (tabla 5.10 pág. 91) y 7 955,24 € (tabla 5.18 pág. 101), respectivamente.

SUPUESTO	COSTE CON DEPÓSITO	COSTE SIN DEPÓSITO	AHORRO
Supuesto 1 [demanda máx. y cte.]	4.043,05 €	5.310,04 €	1.266,99 €
Supuesto 2 [demanda variable]	2 719,41 €	7 955,24 €	5.235,83 €

DIFERENCIA DE AHORRO: 3.968,84 €

Tabla 5.19

Se puede observar en la tabla 5.19 que con el supuesto 1, el ahorro es un 76% menor al del supuesto 2. Por lo tanto, al ser este último más cercano a la realidad, se concluye que el ahorro de 2 909,58 €/año calculado en el Paso 1.4, es el ahorro mínimo que se conseguiría al implantar este método de acumulación de frío.

2) Amortización del depósito y de la bomba de impulsión

La dependencia del ahorro frente a la demanda es notable, por tanto, es evidente y que el periodo de amortización sea mucho menor que el calculado en el supuesto 1 (26,89 años).

Para respaldar la afirmación anterior, se va a calcular el periodo de amortización para demanda variable suponiendo que no se ahorrara más en todo el año que los 5 235,83 € del mes de julio y que la inversión inicial fuera igual a la del supuesto 1 (78 250 €). Claramente esta suposición es bastante restrictiva, pero quiere poner de manifiesto que este segundo supuesto, con un mínimo de utilización de un mes, arroja un periodo de amortización sensiblemente inferior al del supuesto 1 discutido en la sección 5.1.4, subapartado 2, pág. 92. El periodo de amortización sería:

$$\begin{aligned} \text{Periodo de amortización} &= \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{ahorro anual (ver Paso 1.4, subapartado 1)}} = \\ &= \frac{78\,250\ \text{€}}{5\,235,83\ \text{€/año}} = \mathbf{15\ \text{años}} \end{aligned}$$

(ec. 5.19)

Este periodo resulta más razonable que el anterior y se debe tener en cuenta que con una demanda real, el ahorro sería mayor, pues falta la suma del de resto de meses en que se utiliza la acumulación de frío.

CAPÍTULO 6:

CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

1. Se elige como objeto de estudio la instalación de climatización existente en un edificio administrativo singular como es el de las Cortes de Castilla y León en Valladolid, del cual existen datos energéticos reales para aplicar una innovación basada en ingeniería energética.
2. El núcleo de esta innovación es aplicar un dispositivo adicional de acumulación de frío para aprovechar la tarifa eléctrica nocturna y contribuir a un ahorro económico en el funcionamiento de la instalación.
3. Más allá de este ahorro económico se incide en que además se contribuye a fomentar un mejor aprovechamiento sostenible de la energía.
4. Se considera como más idóneo para la acumulación de frío la utilización de materiales de cambio de fase (en inglés, *Phase Change Materials*, PCM) aportando un amplio estudio panorámico de sus diferentes tipos y características.
5. Se describe el sistema de producción de frío para climatizar los recintos de las Cortes de Castilla y León formado por 2 enfriadoras condensadas por aire, 1 enfriadora condensada por agua y 1 enfriador adiabático como elementos principales de la instalación.
6. Se desarrolla un detallado estudio justificativo del empleo de este sistema de acumulación de frío bajo dos supuestos, a saber, demanda de frío máxima y constante por un lado, y demanda de refrigeración variable (en función del horario) por otro, estudiando cada supuesto bajo dos condiciones de funcionamiento, producción nocturna con depósito de PCM y producción diurna sin depósito de PCM.
7. Cuando se opera con demanda de frío máxima y constante con tarifa eléctrica nocturna y depósito de PCM se obtiene un ahorro anual medio del 11,7% frente al funcionamiento con tarifa diurna y sin depósito de PCM.
8. Como contraste a este supuesto se ha estudiado también el caso de demanda de refrigeración variable en función del horario tanto con depósito de PCM y producción de frío nocturno, como sin depósito de

PCM y producción de frío diurno durante un mes de julio con demanda típica, conduciendo a un ahorro específico medio del 65,82%.

9. El periodo de amortización del sistema de acumulación de frío se ha calculado tanto para el supuesto 1, demanda máxima y constante, más alejado de la realidad, como para el supuesto 2, de demanda variable, más cercano a una situación real. Como resultado, se tiene que para la primera situación el periodo de amortización es de 26,89 años frente a un máximo de 15 años en la segunda situación. Por tanto, se concluye que el sistema resulta rentable, especialmente con el segundo supuesto, ya que su vida útil se estima en 30 años.
10. Se ha consultado una amplia bibliografía referenciada en el capítulo 7 y que comprende, aparte de libros, manuales y artículos, contenidos de sitios web. Todos ellos debidamente referenciados.

CAPÍTULO 7:

BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agencia Tributaria, *Impuesto sobre la electricidad*, 2014 (PDF de acceso *online*).
- [2] ATINAFU, D. G. et al., «Introduction of organic-organic eutectic PCM in mesoporous N-doped carbons for enhanced thermal conductivity and energy storage capacity», *Applied Energy* (Elsevier) 211 (2018), 1203–1215.
- [3] Carrier United Technologies, *Jornadas sobre eficiencia energética*, mayo 2017 (PDF de acceso *online*).
- [4] Documentación proporcionada en la asignatura de Máquinas Hidráulicas y Térmicas de 4.º curso del Grado de Ingeniería Mecánica, 2017-2018 (UVa).
- [5] Documentación proporcionada en la asignatura de Termodinámica Térmica y Transmisión de Calor de 2.º curso del Grado de Ingeniería Mecánica, 2015-2016 (UVa).
- [6] Ecologistas en Acción, *Propuesta ecologista de generación eléctrica para 2020. Plan de transición hacia un uso de la energía justo y sostenible*, 2011 (PDF de acceso *online*).
- [7] Entidad Supervisora Independiente de Proyectos Energéticos (ESIPE), *Tarifas de acceso a redes eléctricas – períodos tarifarios* (PDF de acceso *online*).
- [8] FLEISCHER, A. S., *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials. Fundamentals and Applications*, New York, Springer, 2015
- [9] GARCÍA ALONSO, J. M., *Prototipo y modelización de un sistema híbrido de bomba de calor geotérmica de lazo abierto con almacenamiento de energía de baja temperatura mediante material de cambio de fase para climatización de edificios*, tesis doctoral, Universidad de Burgos 2016.
- [10] HAOSHAN, G. et al., «Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: An emerging frontier in energy area», *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21 (2013), 331-346.
- [11] HERRERA MERINO, J. C. et al., «Experimental analysis of performance, greenhouse gas emissions and economic parameters for two cooling systems

in a public administration building», *Energy and Buildings* (Elsevier) 108 (2015), 145–155.

- [12] HERRERA MERINO, J. C., *Análisis experimental de la instalación de climatización de un edificio administrativo singular para la reducción del consumo energético y de las emisiones de gases de efecto invernadero*, tesis doctoral, Universidad de Valladolid 2017.
- [13] JAMEKHORSHID, A. et al., «A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium», *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Elsevier) 31 (2014), 531–542.
- [14] JIMÉNEZ ABAD, R., *Gestión activa de la demanda en el sector residencial. Estado del arte de los proyectos en curso*, Trabajo de Fin de Grado, Universidad Carlos III 2013.
- [15] JIMÉNEZ JEREZ, C., *Gestión activa de la demanda en el sector servicios. Estado del arte de los proyectos en curso*, Trabajo de Fin de Grado, Universidad Carlos III 2013.
- [16] JUÁREZ, D. et al., «Classification of phase change materials and his behaviour in SEBS/PCM blends», *Proceedings of the 5th Manufacturing Engineering Society International Conference*, Zaragoza, junio 2013.
- [17] KOTAS, T. J., *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, London, Butterworths, 1985.
- [18] LEAL TOVAR, D. F., *Aplicación del análisis exergético a una instalación de producción de hidrocarburos de Ecopetrol S.A.*, Trabajo de Fin de Máster, Universidad Libre de Bogotá 2017.
- [19] LÓPEZ HERRERA, E. P., *Análisis del sistema energético de una planta industrial mediante el método exergético*, Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Valladolid 2017.
- [20] MANTZ, DAWN, *How to Determine What Type of Phase Change Material Is a Good Fit for your Application*, Microtek Laboratories, Inc., 2018 (PDF de acceso online).
- [21] MORAN, M. J.; H. N. SHAPIRO, *Fundamentos de termodinámica técnica*, Barcelona, Reverté, 2004 (2.^a ed.).

- [22] MUÑOZ SÁNCHEZ, B. et al., «Encapsulated high temperature PCM as active filler material in a thermocline-based thermal storage system», *Energy Procedia* (Elsevier) 69 (2015), 937 – 946.
- [23] OLIVER, A. et al., «Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica», *Materiales de Construcción* vol. 62 (2012), 305, 131-140.
- [24] ORELLANA ABREU, A., *Análisis exergético de bienes de equipo.*, Proyecto Final de Carrera, Universidad Politécnica de Cataluña 2017.
- [25] Phase Change Material Products Ltd., *Phase Change Materials (PCM) Thermal Energy Storage (TES) Design Guide*, 2011 (PDF de acceso online).
- [26] Red Eléctrica de España, *El vehículo eléctrico. Una prometedora alternativa de futuro*, (PDF de acceso online).
- [27] Red Eléctrica de España, *Guía de consumo inteligente*, 2010 (PDF de acceso online).
- [28] SHARMA, A. et al., «Review on thermal energy storage with phase change materials and applications», *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Elsevier) 13 (2009), 318–345.
- [29] SIEMENS, *Sistema de gestión de edificios GAMMA: gestión automática de cargas con limitador de cargas pico, seccionador de potencia y contactores SIRIUS*, (PDF de acceso online).
- [30] WHIFFEN, T. R. et al., «A review of PCM technology for thermal energy storage in the built environment: Part I», *International Journal of Low-Carbon Technologies* 8 (2013), 147–158.

Sitios web:

- [31] Agencia Estatal de Meteorología (AEMET):
<http://www.aemet.es/es/conocerlas/> (consultada en junio 2019).
- [32] Almacenamiento energético (Red Eléctrica de España):
<https://www.ree.es/es/red21/almacenamiento-energetico> (consultada en abril de 2019).

- [33] Calendario laboral 2019 en Castilla y León: días festivos y puentes (El Mundo):
<https://www.elmundo.es/economia/2018/11/02/5bdc2af8e2704ea09f8b4686.html> (consultada en marzo 2019).
- [34] Datos del clima: <https://es.climate-data.org/europe/espana/castilla-y-leon/valladolid-581/> (consultada en junio de 2019).
- [35] Demanda de energía eléctrica del 09-07-2018 (Red Eléctrica de España):
<https://demanda.ree.es/visiona/peninsula/demanda/total/2018-07-09>
(consultada en abril de 2019).
- [36] Diccionario de la Real Academia de Ingeniería: <http://diccionario.raing.es/>
(consultada en marzo de 2019).
- [37] Grundfos, seleccionador de bombas: <https://product-selection.grundfos.com/front-page.html?qcid=465280198> (consultada en marzo 2019).
- [38] Grundfos: empresa proveedora de bombas: <https://es.grundfos.com/>
(consultada en mayo de 2019).
- [39] Hábitos de consumo (Red Eléctrica de España):
<https://www.ree.es/es/red21/eficiencia-energetica-y-consumo-inteligente/nuestros-habitos-de-consumo> (consultada en abril 2019).
- [40] Integración de energías renovables (Red Eléctrica de España):
<https://www.ree.es/es/red21/integracion-de-renovables> (consultada en abril de 2019).
- [41] La demanda eléctrica (Twenergy Endesa) <https://twenergy.com/a/la-demanda-electrica-953> (consultada en abril de 2019).
- [42] Nueva sede de las Cortes de Castilla y León
<http://www.ciudadfcc.com/es/-/nueva-sede-de-las-cortes-de-castilla-y-leon>
(consultada en junio de 2019).
- [43] Rubitherm Technologies GmbH, Phase Change Material:
<https://www.rubitherm.eu/> (consultada diciembre 2018).

- [44] Servicio de interrumpibilidad (Red Eléctrica de España):
<https://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema-electrico/servicio-de-interrumpibilidad> (consultada en abril de 2019).
- [45] Término de potencia (Iberdrola):
<http://ayuda.clientes.iberdrola.es/pregunta-frecuente/que-es-el-termino-de-potencia/> (consultada en marzo 2019).