

# Acumulación de Frío. Optimización y Eficiencia Energética

Optimización
--------------

Eficiencia Energética
-----------------------

JUAN CARLOS LOZANO MEDINA

INGENIERO INDUSTRIAL

PROFESOR ASOCIADO ULPGC

ISBN 978-84-16989-18-8

15 DE ABRIL 2014

## **INDICE**

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>ACUMULACIÓN DE FRIO .....</b>	<b>4</b>
<b>ACUMULACIÓN POR CAMBIO DE FASE. ....</b>	<b>4</b>
<b>ACUMULACIÓN MEDIANTE MEZCLAS EUTÉCTICAS.....</b>	<b>6</b>
<b>MEZCLAS EUTÉCTICAS CON SALMUERA.....</b>	<b>8</b>
<b>APLICACIÓN.....</b>	<b>11</b>

## INTRODUCCIÓN

Mantener el frío es una preocupación constante en el mundo industrial, es de vital importancia de cara a muchos procesos productivos y de logística en los que necesitamos que los componentes que integran dichos procesos se encuentren a una determinada temperatura. Partiendo de la base de que producir frío es caro surgen alternativas como los acumuladores de frío para paliar la relación calidad-costes que existe en aquellos procesos como cadenas de frío en los que es vital mantener la temperatura del producto.

La acumulación de calor o de frío permite aprovechar nuevas fuentes térmicas y en general las energías renovables variables en el tiempo, como la térmica del aire ambiente y la solar. Se considera que al poder separar la producción de la demanda se abre un amplio campo de posibilidades interesantes, desde el punto de vista energético y económico. Dado que los materiales de cambio de fase conocidos internacionalmente como PCM, pueden almacenar mucha energía térmica a una temperatura determinada precisamente la de su cambio de fase o estado son unos materiales ideales para la acumulación. En general los que se aprovechen los cambios de licuación o solidificación son los más idóneos por no necesitan recipientes que trabajen a presión.

El primer elemento que se ha empleado para acumular frío en la climatización ha sido el hielo, tecnología que se ha visto frenada por requerir empleo de mezclas glicoladas y por la disminución de eficiencia al tener que evaporar mucho más bajo las instalaciones de producción de frío. El hielo en pequeñas porciones en suspensión ha comenzado a emplearse presentando importantes ventajas y algunos inconvenientes.

Se pensó que el empleo de los PCM positivos, es decir que la temperatura de cambio de fase fuese por encima de 0 °C podría ser interesante y se colaboro en el desarrollo de nuevas instalaciones de climatización. También se ha visto que en algunos casos interesantes se podría prescindir de los sistemas de enfriamiento de compresión mecánica o reducirlos grandemente aprovechando el frío gratuito o "free cooling" y el enfriamiento evaporativo.

También se ha ido viendo las ventajas que estos materiales presentan para aumentar la inercia de las construcciones y mejorar las resistencias reales de los cerramientos y hasta de las instalaciones de climatización y facilitar el empleo de máquinas mayores y más eficientes al permitir la regulación de capacidad de estas.

En el caso de la cogeneración y de la trigeneración se había visto que para conseguir acortar los tiempos de amortización es fundamental aumentar los

tiempos de funcionamiento anual, lo que se puede conseguir con el empleo de los PCM.

El objetivo pretendido es, analizar las posibilidades que presentan los diferentes tipos de acumulación de frío y su papel en el aumento de la eficiencia energética en diferentes aplicaciones.

## ACUMULACIÓN DE FRÍO

La acumulación de frío es la absorción y almacenaje en un dispositivo de acumulación, durante un determinado periodo de tiempo, parte o toda la capacidad frigorífica de una instalación en horarios convenientes, por la baja demanda térmica o bajo costo de la energía eléctrica, para hacer entrega de ella en otro período.

Existen varios productos utilizados en la fabricación de dispositivos de acumulación de frío, a continuación se exponen los productos mas habituales:

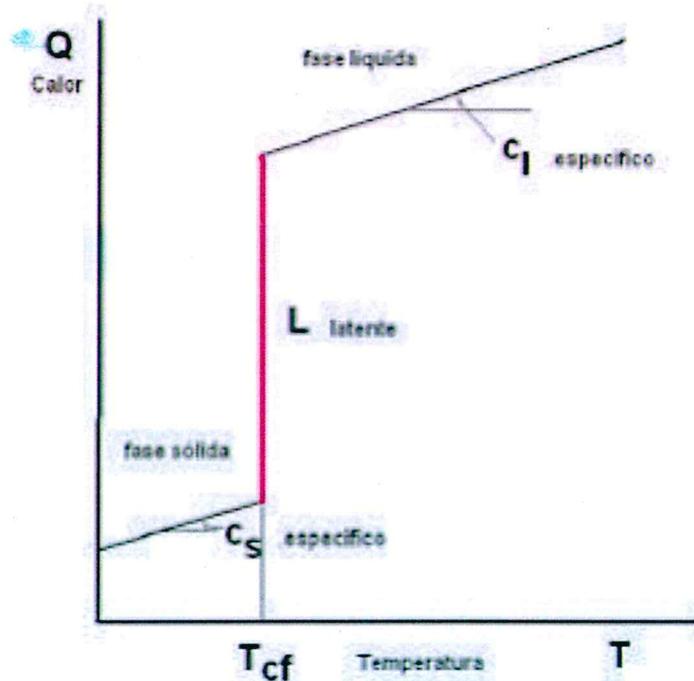
- Acumulación de frío mediante materiales de cambio de fase o PCM.
- Acumulación de frío mediante sales eutécticas.

En este documento se trataran varios tipos de acumulación de frío, como lo son: la acumulación por cambio de fase (PCM), mezclas eutécticas y salmueras.

## ACUMULACIÓN POR CAMBIO DE FASE.

Los PCM presentan en sus cambios de fase una capacidad de almacenar calor o frío, que absorben o liberan un calor latente para producir el cambio de fase. Para que este cambio de fase se efectúe es necesario mucho calor, en el caso del agua, la solidificación se produce a 0 °C, y el calor necesario es muy grande, de 80 kcal/kg, es decir, 533 kJ/kg.

Como se dice anteriormente, los PCM se caracterizan por necesitar mucho calor para que se efectúe el cambio de fase, permaneciendo a temperatura prácticamente constante durante dicho cambio, es decir que se comportan como se ha representado en la siguiente figura.



En la figura superior podemos observar como para que se produzca el cambio de fase es necesaria la aplicación de mucha energía, y hasta que se produce dicho cambio de estado la temperatura se mantiene constante. Con esta gráfica nos damos cuenta de que estos acumuladores de frío tendría interesantes aplicaciones en operaciones de transporte donde el calor aporta al elemento que buscamos enfriar es prácticamente constante por lo que el cambio de fase se produciría de manera lenta.

Los PCM pueden ser de diferentes naturalezas y propiedades termofísicas y presentar el cambio de fase a diversas temperaturas, se puede ver en la amplia Bibliografía disponible que es fácil encontrar uno de buenas propiedades para la temperatura deseada. Dependiendo de la composición molecular, cada sustancia tendrá una temperatura y una capacidad de almacenamiento de calor latente.

En la siguiente tabla se indican las propiedades básicas de uno interesante para emplearse sobre los 6 a 7°C.

Magnitud	Unidades	valor
Temp. Cambio de fase	°C	7
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	1.100
Calor latente	kJ/kg	167,2
Coeficiente de Conductividad sólido	W/(m.K)	0,58
Coeficiente de Conductividad líquido	W/(m.K)	0,291
Calor específico sólido	J/(kg.K)	1.756
Calor específico líquido	J/(kg.K)	836

## ACUMULACIÓN MEDIANTE MEZCLAS EUTÉCTICAS.

De manera intuitiva se podría pensar que el hielo es el elemento idóneo para la conservación de los productos, sin embargo como elemento refrigerante está limitado por su punto de fusión para la obtención de bajas temperaturas, por lo que sólo sería apropiado su uso para determinadas aplicaciones. Para temperaturas inferiores, se han ido desarrollando otros productos que tengan valores próximos a la del agua, basándose, sobre todo, en sales eutécticas. En este sentido, las mezclas eutécticas conseguidas con determinadas soluciones se congelan para poder utilizarlas, beneficiándonos del calor absorbido en la fusión y de su bajo punto de fusión.

La temperatura de congelación variará en función de la proporción de los componentes, estando ésta comprendida entre los valores de cada uno de los componentes en estado puro. Por este motivo conforme variemos la concentración de uno de los integrantes de nuestra mezcla la temperatura de mezcla eutéctica será mayor o menor, llegando a un punto máximo de concentración de soluto en el cual no podamos reducir más la temperatura de congelación, será esta la temperatura de eutéctica, y la mezcla que hace posible alcanzar dicho valor será la mezcla eutéctica. En el caso de que siguiéramos añadiéndole a la solución más proporción del soluto que solidifica a la temperatura más baja, conseguiríamos el efecto contrario: es decir, un aumento de la temperatura de fusión.

Para conseguir esa acumulación de frío mediante las mezclas eutécticas, una vez hayamos unido nuestros componentes en estado líquido y la solución se haya estabilizado procederemos a la solidificación del compuesto mediante la aplicación de frío. La congelación de esta mezcla tiene la ventaja de que se produce a una temperatura más baja, lo que permite mantener el frío durante más tiempo. Durante el cambio de fase de sólido a líquido sólo se produce intercambio de calor latente, es decir se produce un intercambio de energía con el medio pero mientras se produzca este cambio de fase la temperatura se mantendrá constante. Esto nos dará la ventaja de mantener la solución, y por consiguiente a nuestro producto, a una temperatura más baja y durante un mayor tiempo.

Una solución eutéctica es, por lo tanto, la que tiene una concentración de sales tal que su punto de congelación sea el mínimo, para una presión dada.

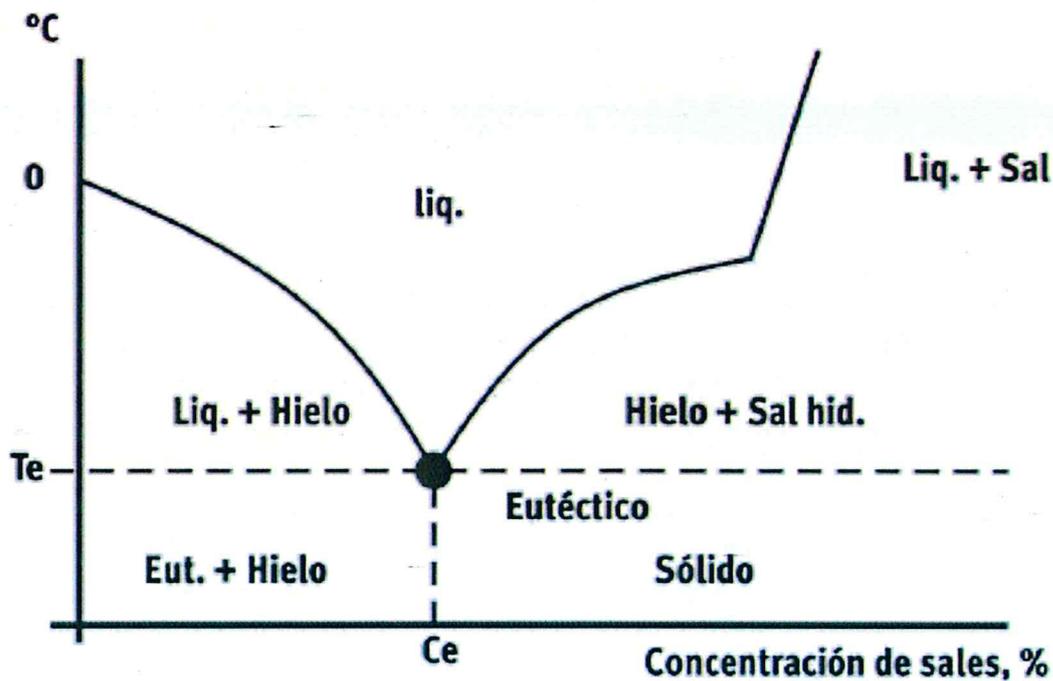


Fig. 1. Fases de la concentración de las sales eutécticas.

En la siguiente tabla podemos observar cómo en función del componente que usemos variará la temperatura de congelación. Es importante señalar que de cara a la selección de los integrantes de la mezcla será igual de importante la temperatura de congelación y el calor de fusión, es decir, la cantidad de energía que tenemos que aportar para que se dé el cambio de fase.

Sal	Concentración (% en peso)	T° de congelación	Calor de Fusión (Kcal/kg)
Cloruro amónico	18.7	-15.8	73.8
Cloruro calcico	29.9	-55.0	50.8
Cloruro magnesico	20.6	-33.6	-
Cloruro potásico	19.7	-11.1	71.9
Cloruro sodico	22.4	-21.2	56.4
Carbonato sodico	35.5	-37.1	-
Hidroxido potasico	31.5	-65.5	-
Nitrato sodico	36.9	-18.5	57.5
Sulfato de magnesio	19.0	-3.9	58.2
Sulfato de zinc	27.2	-6.5	20.9

## MEZCLAS EUTÉCTICAS CON SALMUERA

Podemos definir salmuera como un tipo de mezcla eutéctica formada por agua y cloruro sódico (sal común), en la que existe una alta concentración de NaCl. Esta mezcla tiene distintas aplicaciones en campos como conservación y curado de alimentos, en sistemas de refrigeración como medio de transmisión de calor debido a su bajo punto de congelación. Como mezcla eutéctica que es, destacamos que la adición de sal produce la reducción de la temperatura de congelación, pero si la concentración de sal aumenta más allá de cierto punto se elevará la temperatura de congelación en vez de reducirse.

La salmuera como medio refrigerante se clasifica dentro de un grupo conocido como refrigerantes secundarios. Estos ayudan a mantener o continuar un proceso, ya sea éste de temperatura de confort en un área, mantener los alimentos conservados o mantener los alimentos refrigerados...

La salmuera como refrigerante secundario se encarga de transmitir el efecto frigorífico desde un circuito primario de refrigeración (desde el evaporador donde es enfriado por el refrigerante primario), al producto a enfriar.

### Tipos de salmuera

A temperaturas inferiores a 0 °C se utilizan las salmueras. Estas pueden ser:

1. Una solución acuosa de sales inorgánicas, por ejemplo, cloruro de sodio o cloruro de calcio, es decir para bajas temperaturas se puede utilizar una mezcla eutéctica.
2. Una solución acuosa de compuestos orgánicos, por ejemplo, alcoholes o glicoles; ejemplos las mezclas de agua y etanol o agua y metanol, el etilenglicol y el propilenglicol.
3. Hidrocarburos halocarburosclorados o fluorados.

El funcionamiento de las mezclas eutécticas con salmuera, es casi idéntico al de las mezclas eutécticas. Una solución de cualquier sal en agua, o en general cualquier solución, tiene un cierta concentración en la que el punto de congelación es un mínimo. Una solución de esta concentración se llama mezcla eutéctica. La temperatura a que se congela es la temperatura eutéctica. Una solución en cualquier otra concentración comienza a congelarse a temperaturas más altas.

Cuando la temperatura de una salmuera cuya concentración es inferior a la eutéctica desciende por debajo del punto de congelación, se forman cristales de hielo y la concentración de la solución residual aumenta hasta alcanzar la temperatura eutéctica. Por debajo de esta temperatura la solución se solidifica formando una mezcla de hielo y solución eutéctica solidificada.

Cuando la temperatura de una salmuera con concentración superior a la eutéctica desciende por debajo del punto de congelación, se depositan cristales del cuerpo disuelto y la concentración disminuye hasta que, a la temperatura eutéctica, la solución restante alcanza la concentración eutéctica. Por debajo de esta temperatura una mezcla de sal y solución eutéctica solidificada.

### **Selección de una salmuera**

La selección de una salmuera está basada en la consideración de los siguientes factores:

1. **Punto de congelación.** La salmuera debe ser adecuada para el funcionamiento a la temperatura más baja.
2. **Aplicación.** Cuando se emplea un sistema de canalización abierta, habrá que verificar la posibilidad de contaminación del producto por la salmuera.
3. **Coste.** La carga inicial y la cantidad necesarias por producto para la reposición o relleno son factores que intervienen en la determinación de los costes.
4. **Seguridad.** Toxicidad e inflamabilidad de la salmuera.
5. **Comportamiento térmico.** La viscosidad, el peso específico, el calor específico y la conductividad se utilizan para determinar el comportamiento térmico.
6. **Adecuabilidad.** La canalización y el material de equipo del sistema requieren una salmuera estable y relativamente exenta de propiedades corrosivas.
7. **Reglamentación.** La salmuera no debe ser recusable por la reglamentación o disposición de carácter general, ordenanzas locales y compañías de seguros.

Los principales tipos de salmueras utilizadas son a base de cloruro cálcico y con cloruro de sodio. En el caso de la salmuera de cloruro de calcio se usa principalmente en enfriadores industriales, en congelación y almacenamiento de productos y en otras aplicaciones de salmuera en las que se requieren temperaturas inferiores a  $-18^{\circ}\text{C}$ . La temperatura de congelación más baja puede

obtenerse con una solución de calcio y es de  $-55^{\circ}\text{C}$ , en este caso la concentración de la sal en la solución es del 30%.

En el caso del cloruro sódico, la temperatura más baja que podemos alcanzar es de  $-21^{\circ}\text{C}$ , necesitando una concentración del 23% en masa. Es interesante destacar que al aumentar el contenido salino de las salmueras disminuye la fluidez, el valor del calor específico y conductancia térmica de la salmuera. Por lo tanto, mientras más concentrada sea la solución de la salmuera, necesitaremos una mayor potencia de bombeo de cara a producir la circulación del fluido para producir un efecto refrigerante.

Los sistemas que utilizan soluciones acuosas de alcohol o glicol son más susceptibles a fugas que aquellos que utilizan sales. Una desventaja del alcohol es su inflamabilidad. Por ello se utilizan principalmente en procesos industriales en que no existen riesgos, y en el mismo margen de temperaturas que las sales (hasta  $-40^{\circ}\text{C}$ ). La toxicidad de la mezcla de agua y metanol (alcohol de madera) es un inconveniente. Por el contrario, la no toxicidad de la solución de agua y etanol (alcohol) es una ventaja.

Los inhibidores de corrosión deben utilizarse con salmueras del tipo de alcohol de acuerdo con las recomendaciones del fabricante del alcohol.

Las soluciones acuosas de glicol se utilizan principalmente en aplicaciones comerciales y no en los procesos industriales. El etilenglicol y el propilenglicol tienen igual corrosividad, la cual puede ser neutralizada por un inhibidor. Las superficies galvanizadas son particularmente propensas a ser atacadas por los glicoles, por lo que no se las debe utilizar.

Para la reposición de salmueras de glicol son recomendables los inhibidores y el agua potable. Deberá ser consultado al fabricante del glicol en cuanto al uso del inhibidor. Algunos fabricantes tienen un servicio de análisis de muestras de salmueras para facilitar el mantenimiento de condiciones satisfactorias de la salmuera en el sistema. Existen glicoles destinados a la transferencia de calor con inhibidores no aceitosos que no disminuyen las propiedades de transferencia (nitruro de sodio o boro).

Se puede utilizar los glicoles como medios de transferencia de calor a temperaturas relativamente altas. Con estabilizadores, la oxidación del glicol en el aire a altas temperaturas es eliminada para todos los fines prácticos.

El etilenglicol es más tóxico que el propilenglicol, pero menos que el agua de metanol. El propilenglicol es preferible al etilenglicol en la congelación de alimentos, por ejemplo.

Los hidrocarburos clorados y fluorados son caros y se utiliza en servicios de muy baja temperatura (inferiores a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

## APLICACIÓN

### Aplicación de las mezclas eutécticas

De manera genérica el frío mecánico es considerado como la principal fuente de producción de frío, ya que puede ser aplicado en varios sectores de la industria de manera efectiva. Sin embargo, existen casos en lo que no se puede aplicar, como por ejemplo en operaciones logísticas en aviones, o en camiones no equipados con cámaras frigoríficas. Será en esas ocasiones en las que las soluciones eutécticas o productos de cambio de fase, cobrarán importancia. Para ello, en función de la temperatura que queramos alcanzar o en función del espacio u otras variables, elegiremos unos envases u otros.

Estos envases pueden ser de tipo rígido o flexible y en su interior contienen la mezcla eutéctica en forma de gel o de fase. En función de la temperatura a la que busquemos congelar elegiremos el tipo de mezcla eutéctica, el envase y el tamaño y dimensiones del mismo. Son capaces de garantizar que la temperatura de los productos se encuentre en un rango de  $-15^{\circ}\text{C}$  hasta  $25^{\circ}\text{C}$ . En este sentido, como materiales de conservación basados en mezclas eutécticas podemos encontrar geles y placas.

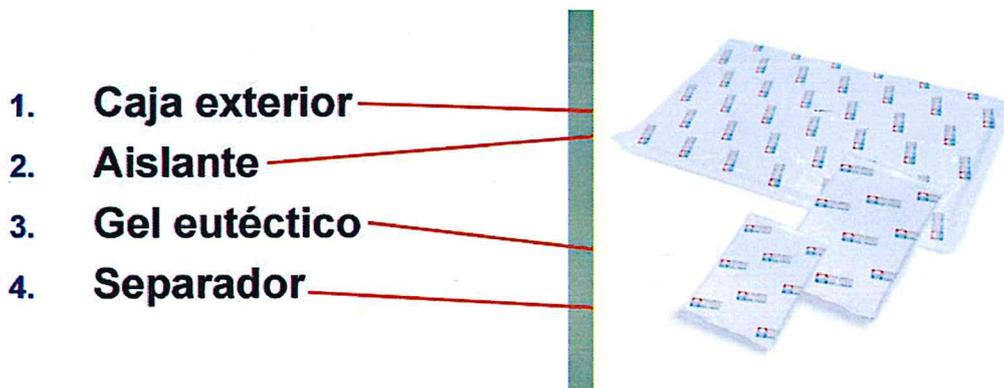
Las placas eutécticas son acumuladores de frío que permiten prolongar la conservación del frío. Se caracterizan por ser reutilizables, ya que podemos reponer el fluido, reciclables y compatibles con todos los medios de transporte, pues al no contener gas están autorizados para el transporte en avión. En general las mezclas eutécticas se caracterizan por no ser ni tóxicos, ni sensibilizantes ni mutágenos. Dentro del gran abanico de empresas que participan en el mercado de las mezclas eutécticas encontramos distintos productos pero todos en general persiguen el mismo fin: conservar el frío mediante un recipiente o envase usando las mezclas eutécticas. Así, existen placas eutécticas que permiten el contacto directamente con el alimento, o placas eutécticas flexibles que permiten adaptarse a la forma del producto, lo que podría ser útil en casos de productos farmacéuticos como vacunas.



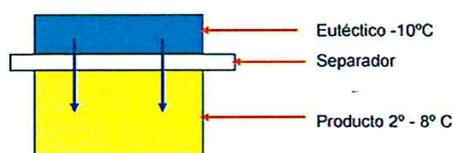
### Placas y geles eutécticos.

También existe la posibilidad de mantener el frío a través de geles eutécticos, que se basan en el mismo principio que las placas eutécticas, pero se diferencian en el formato en el que se presentan. Se caracterizan por tener un precio ligeramente inferior, ya que están formadas por bolsas de plástico a veces las cuales, a diferencia de las placas eutécticas, no se pueden volver a utilizar.

A la hora de transportar alimentos, productos perecederos o vacunas tenemos que tener en cuenta los elementos que conforman el proceso:



La caja exterior es la encargada de salvaguardar el contenido de ésta, el aislante se caracteriza por tener un bajo coeficiente de transmisión de calor con el objetivo de minimizar el intercambio de calor con el exterior; el aislante está hecho de poliuretano. Finalmente encontramos el separador, encargado de evitar un choque térmico entre el gel eutéctico y el producto, esto se hace para que no se produzca la congelación del producto.



Separador.

Como se señaló anteriormente, las mezclas eutécticas tienen amplia aplicación en sectores de logística en los que mantener la temperatura del producto es algo esencial. Con el objetivo de controlar la temperatura de los eslabones que integran la cadena de frío podemos encontrar diferentes elementos como indicadores de temperatura. Los registradores multiusos miden la temperatura en intervalos de tiempo predeterminados, estos registros tienen el inconveniente de que a pesar de aportan datos e información precisa, son caros. De manera más económica encontramos las tiras con cambio de color y las ampollas con líquido en el interior, en el primer caso son tiras impregnadas de un producto químico que cambia de color en función de la temperatura, en el segundo, las ampollas se rompen cuando se congelan debido a que el líquido que tienen en su interior se expande.

Las soluciones eutécticas usadas en las placas acumuladoras de frío se caracterizan por:

- Presentar una zona estrecha de temperatura de cambio de fase.
- Temperatura de cambio de fase requerida.
- Gran capacidad de almacenamiento de frío por unidad de volumen.
- Deben ser económicas.
- No ser tóxicas.
- Buena estabilidad química.
- Poseer adecuada conductividad térmica.
- Poseer cinética de cristalización rápida.
- Ser compatibles con los materiales en donde se las contenga.
- No variar grandemente su volumen con la temperatura.
- No producir grandes presiones al solidificarse.
- No ser inflamables y presentar seguridad en su utilización.

Las ventajas que presentan estos elementos acumuladores de frío permiten lograr:

- La optimización de la producción de frío: mediante la acumulación de frío puede optimizarse la eficiencia de las máquinas y evitar los sistemas de regulación de capacidad que bajan los rendimientos.
- La disminución de los costos de electricidad aprovechándose de las tarifas nocturnas y evitando las penalizaciones del horario pico.
- El disponer de una reserva de frío para una emergencia o en paradas para mantenimiento, de particular interés en zonas rurales, donde los cortes de electricidad pueden ser prolongados.
- Eliminar los problemas que se presentan con el empleo de fuentes energéticas intermitentes, o regular los consumos energéticos totales, aprovechándose de las producciones de calor de otros servicios.

## **Aplicación de los PCM**

Los PCM en las aplicaciones hay que colocarlo en un medio o envase, que puede ser buen conducto del calor o no y tener superficies adicionales o no, elementos que facilitarían o no la transmisión de calor. Como es sabido que en los intercambiadores de calor, el calor puesto en juego, depende del salto de temperatura, del área y del coeficiente global de transmisión. Si los tiempos de carga y descarga deseados en las diversas aplicaciones son grandes, se puede diseñar con materiales económicos, como pueden ser los plásticos.

Hoy en día el ahorro energético está a la orden del día y una de las maneras de propiciarlo se basa en el uso de la arquitectura bioclimática, en la que se busca aprovechar las condiciones ambientales del lugar con el objetivo de propiciar un ahorro energético. Éstos materiales además tienen aplicaciones para sustituir sistemas de producción de calor y frío tradicionales, pudiendo generar temperaturas de confort. Su aplicación se fundamenta en aprovechar el calor latente del cambio de fase del material para que durante el día absorban calor de la luz del sol y cedan frío durante su cambio de fase, mientras que de noche ceda el calor absorbido durante el día al edificio mientras se solidifica la mezcla.

### **Aplicación en arquitectura bioclimática.**

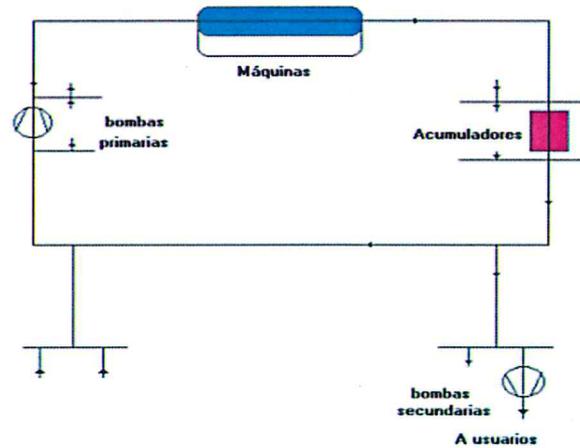
Una de las aplicaciones que se han desarrollado consiste en paneles de apariencia similar al yeso que contienen PCM, de este modo se ha conseguido reducir en un 40% el consumo energético en los edificios. Este nuevo elemento tiene un grosor de 1.5 cm y es capaz de almacenar 5 veces más la energía de un panel de yeso convencional con el mismo espesor, con esto se consigue mantener la temperatura de confort entre 20 y 30°C sin requerir a sistemas de climatización.

Los productos de cambio de fase tienen diversas aplicaciones como en ventanas, donde durante el día reciben radiación de tal forma que se derrite el líquido de cambio de fase y por la noche se solidifica radiando el calor del PCM hacia la habitación.

Podemos decir que es una técnica relativamente novedosa que todavía se sigue estudiando, a pesar de ya se ha comprobado su eficacia en hormigones, yesos y demás elementos constructivos.

## INSTALACIONES DE CLIMATIZACIÓN

En las instalaciones de climatización los PCM se pueden instalar a la salida de las máquinas de producción de frío con la temperatura de cambio de fase próxima a los 6 °C como se ha indicado en la siguiente figura o en el lazo de cierre del circuito primario, también a temperaturas de cambio de fase de 6 a 7 °C.



## SISTEMAS DE TRIGENERACIÓN

Otras aplicaciones importantes que se han visto son la acumulación de calor o de frío en los sistemas de cogeneración. Introduciendo máquinas de absorción puede cubrirse la calefacción y la climatización junto a la cogeneración, se puede acumular frío como puede verse en la siguiente figura.

