0. Introducción.

Dadas las necesidades de ahorro energético en la sociedad actual se ha intentado abordar una solución práctica para mejorar la eficiencia de las instalaciones con mayor consumo en el sector terciario. Esto es, los sistemas de climatización.

Actualmente en España, el 26% de la energía final es consumida por el sector Edificación, frente al 31% y 38% del sector Industria y Transporte. Atendiendo a este mismo indicador por servicios disponibles en edificios del sector residencial y terciario, se obtienen unos valores de consumo en climatización del 42% y 59%, respectivamente. En resumen, en España aproximadamente un 12.5% de la energía final es consumida por instalaciones de acondicionamiento térmico en la edificación (IDAE, 2005).

En cuanto a la emisión de gases de efecto invernadero, aproximadamente el 25 % en construcciones del sector edificación proviene de los sistemas de climatización (Orme, 2001).

Dentro de los objetivos de la Unión Europea, asumidos por España y recogidos en el Plan de Acción para la eficiencia energética 2008-2012 (IDAE, 2007), se encuentra aumentar la eficiencia de los sistemas de climatización para disminuir el consumo energético. Para ello, se podrían optimizar desde el recorrido de los fluidos, con el objetivo de minimizar la perdida de carga y reducir el consumo en impulsores, hasta cada una de las etapas del ciclo termodinámico de producción de frio. Atendiendo a esto, es posible la mejora de la etapa de compresión, insertando tanto un compresor de alto rendimiento como etapas de refrigeración intermedias en la compresión, y de la etapa de cesión y/o absorción de calor.

En zonas con climas mediterráneos, entre las que se encuentra España, las necesidades de refrigeración son mayores que las de calefacción. Debido a que las regiones tratadas en este documento se encuentran en territorio nacional, el estudio ha sido realizado en condiciones de verano en régimen de refrigeración.

En el ciclo de producción de frio, la temperatura de evaporación del refrigerante está fijada por la temperatura del local que deseamos climatizar, mientras que la temperatura de condensación se encuentra fijada por las condiciones térmicas del medio al que evacuamos el calor.

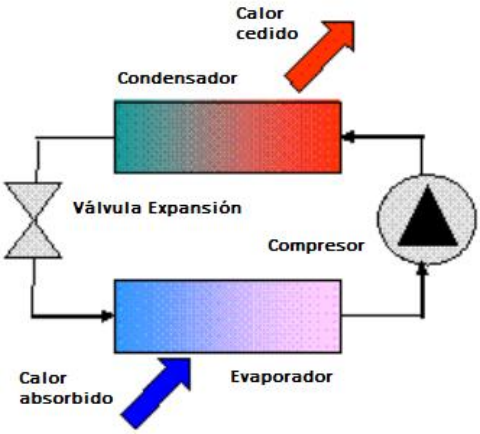

Figura 1.- Ciclo de compresión mecánica.

Es bien conocido que el aumento de la temperatura de evaporación o la disminución de la temperatura de condensación conlleva una disminución del consumo eléctrico en la

etapa de compresión, y en consecuencia un incremento del rendimiento del sistema. Por ello, puesto que la temperatura de absorción de calor está fijada según las necesidades frigoríficas, interesaría disminuir lo máximo posible la temperatura del medio al que evacuamos la energía térmica, para poder reducir la temperatura a la que condensa el refrigerante. Expresado de otra manera, cuanto menor sea esta temperatura, mayor intercambio térmico existirá en el condensador, menor será el consumo eléctrico del compresor, y en consecuencia, mayor será el rendimiento de la máquina frigorífica.

La absorción de energía térmica se realiza, directamente, a través de un intercambiador de calor situado en la zona térmica que deseamos enfriar, mientras que para la cesión de calor se abren múltiples alternativas.

Las principales disposiciones son:

- **Ceder la energía térmica en un condensador enfriado por aire.**

En este tipo de intercambiadores, el fluido caliente circula por el interior del banco de tubos cediendo energía térmica al aire que circunda éstos. El aire puede fluir en dos modos:

- Convección libre

  El aire circula por diferencia de densidades desde la zona inferior (fluido frio, mayor densidad) hasta la parte superior (fluido caliente, menor densidad) del dispositivo.

- Convección forzada

  El aire es movido por un impulsor que puede estar colocado al principio (tiro forzado) o al final (tiro inducido) del trayecto que sigue el fluido en el interior del condensador.

Esta opción tiene como aspecto positivo la libre elección del lugar de implantación por el hecho de la supresión de las servidumbres del agua de refrigeración, además de la reducción del consumo de agua.

Como inconvenientes se pueden destacar que el coeficiente convectivo que rige la transferencia de calor por convección es muy reducido, lo que obliga a recurrir a grandes superficies de intercambio para poder transferir toda la potencia térmica requerida. Para ello, suele recurrirse al aleteado de la superficie de intercambio, no lográndose grandes avances especialmente en climas cálidos, donde el aire se encuentra a elevada temperatura. Otro aspecto negativo en grandes condensadores, es el elevado ruido producido por el ventilador al tener que mover un caudal tan elevado.

Este tipo de condensadores es el más utilizado en refrigeradores de pequeño y medio tamaño como neveras, botelleros, pequeñas cámaras frigoríficas, equipos de aire acondicionado de tipo domestico, etc.

- **Expulsar el calor en un condensador enfriado por agua (torre de refrigeración).**

En las torres de enfriamiento o refrigeración se consigue disminuir la temperatura del fluido caloportador caliente, que proviene del circuito de refrigeración del ciclo termodinámico, mediante la transferencia de calor y materia al aire que circula por el interior de la torre. A fin de mejorar el contacto aire-agua, se utiliza un entramado denominado "relleno". El agua entra en la torre por la parte superior y se distribuye uniformemente sobre el relleno utilizando pulverizadores. De esta forma, se consigue un contacto óptimo entre el agua y el aire atmosférico.

El relleno sirve para aumentar el tiempo y la superficie de intercambio entre el agua y el aire. Una vez establecido el contacto entre el agua y el aire, tiene lugar una cesión de calor del agua hacia el aire. Ésta se produce debido a dos mecanismos: la transmisión de calor por convección y la transferencia de vapor desde el agua al aire, con el consiguiente enfriamiento del agua debido a la evaporación.

En la transmisión de calor por convección, se produce un flujo de calor en dirección al aire, que rodea el agua, a causa de la diferencia de temperaturas existente entre ambos fluidos.

La tasa de enfriamiento por evaporación es de gran magnitud en las torres de enfriamiento, alrededor del 90 % es debida al fenómeno difusivo. Al entrar en contacto el aire con el agua se forma una fina película de aire húmedo saturado sobre la lámina de agua que desciende por el relleno. Esto es debido a que la presión parcial de vapor de agua en la película de aire es superior a la del aire húmedo que circula por la torre, produciéndose una cesión de vapor de agua (evaporación). Esta masa de agua evaporada extrae el calor latente de vaporización del propio líquido. Este calor latente es cedido al aire, obteniéndose un enfriamiento del agua y un aumento de la temperatura del aire. La diferencia de temperaturas del agua a la salida y la temperatura húmeda del aire se llama *"acercamiento"* o *"aproximación"*, ya que representa el límite termodinámico de enfriamiento al que puede llegar el agua.

La Figura 2 detalla lo anteriormente comentado.

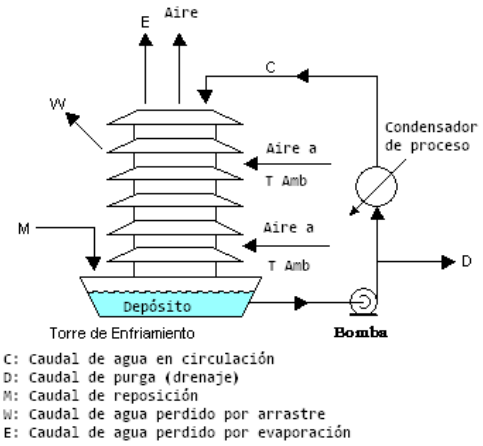

Figura 2.- Torre de refrigeración.

Según la forma en que se mueve el aire en su interior, las torres de enfriamiento se pueden clasificar en torres de circulación natural y torres de tiro mecánico. En las torres de circulación natural, el movimiento del aire sólo depende de las condiciones climáticas y ambientales mientras que en las torres de tiro mecánico se utilizan ventiladores para mover el aire a través del relleno.

Las torres de circulación se pueden distinguir en torres atmosféricas y en torres de tiro natural. Las torres atmosféricas utilizan las corrientes de aire de la atmósfera. El aire se mueve de forma horizontal y el agua cae verticalmente (flujo cruzado). Son torres de gran altura y pequeña sección transversal. Una torre de tiro natural es aquella en la que el aire es inducido por una gran chimenea situada sobre el relleno. La diferencia de densidades entre el aire húmedo caliente y el aire atmosférico es el principal motivo por el cual se crea el tiro de aire a través de la torre. La diferencia de velocidades entre el viento circulante a nivel del suelo y el viento que circula por la parte superior de la chimenea también ayuda a establecer el flujo de aire. Por ambos motivos, las torres de tiro natural han de ser altas y, además, deben tener una sección transversal grande para facilitar el movimiento del aire ascendente.

Las torres de tiro mecánico proporcionan un control total sobre el caudal de aire suministrado. Se trata de torres compactas, con una sección transversal y una altura de bombeo pequeñas en comparación con las torres de tiro natural. En estas torres se puede controlar de forma precisa la temperatura del agua de salida, y se pueden lograr valores de *acercamiento* muy pequeños (hasta de 1 o 2 ºC, aunque en la práctica acostumbra a ser de 3 o 4 ºC). Si el ventilador se encuentra situado en la entrada de aire, el tiro es forzado (Figura 4). Cuando el ventilador se ubica en la zona de descarga del aire (Figura 3), se habla de tiro inducido [13].

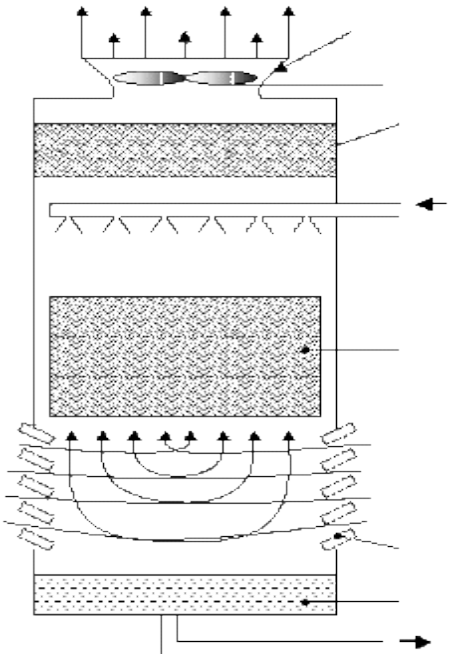

Figura 3.- Torre de tiro inducido.

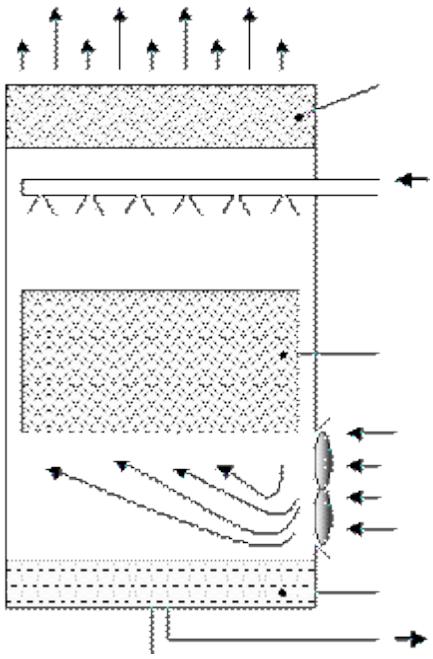

Figura 4.- Torre de tiro forzado.

El mayor inconveniente de esta forma de intercambiar energía térmica es la necesidad de la utilización de un intercambiador de calor intermedio entre el fluido refrigerante del ciclo termodinámico y el fluido utilizado en la torre (normalmente agua).

La ventaja más destacada es la necesidad de menos superficie de intercambio al existir un gradiente térmico más elevado y un coeficiente convectivo mayor (contacto directo del agua con el aire introducido en la torre de refrigeración). Cuando se condensa por agua, la transferencia de calor en el condensador es más eficiente debido a los valores del coeficiente de película. A título orientativo, el coeficiente de película en agua es del orden de 1 000 $\frac{W}{m^{2}\cdot°C}$ mientras que el correspondiente para el aire es del orden de 50 $\frac{W}{m^{2}\cdot°C}$.

- **Disipar energía térmica contra el terreno.**

En este caso, el terreno es el medio contra el que se evacúa la energía térmica sobrante en el condensador. El procedimiento es introducir un cierto número de tubos en el terreno a una determinada profundidad, en diferentes configuraciones, con los que poder intercambiar mayor cantidad de calor que en las disposiciones anteriores, ya que la temperatura media del subsuelo es considerablemente menor que la temperatura de las utilidades frías de los casos anteriores.

Las ventajas de esta forma de disipación térmica son las siguientes:

- La temperatura del subsuelo por debajo de una cierta profundidad se mantiene aproximadamente constante a lo largo de todo el año debido a la gran inercia térmica con la que cuenta el terreno. Por ello, en régimen de refrigeración,

resulta más favorable disipar el calor contra el terreno, ya que la temperatura del subsuelo será menor que la del aire. En invierno (periodo más desfavorable en régimen de calefacción) sucede lo recíproco, ya que la temperatura de la corteza terrestre será superior a la del aire, y el intercambio energético con fluido caloportador frío será más favorable para producir calor en la zona térmica a climatizar.

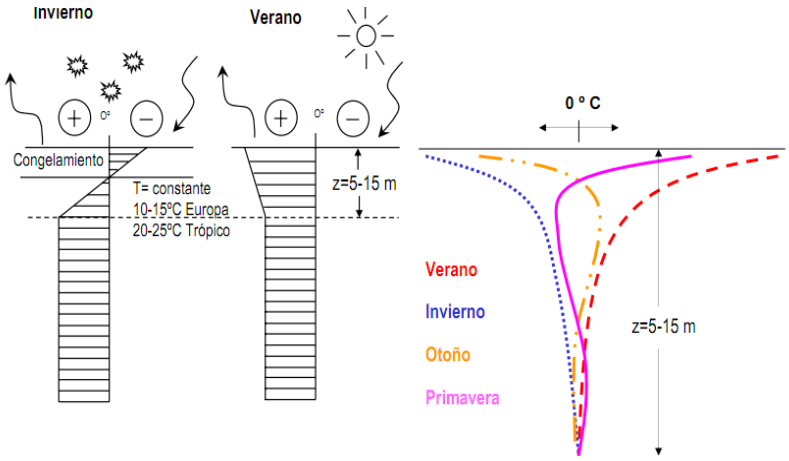

Figura 5.- Distribución temperaturas en el subsuelo en distintas épocas del año.

Como puede observarse en la Figura anterior, a partir de una determinada profundidad, la temperatura de la corteza terrestre se mantiene constante a lo largo de todo el año. La distribución de temperatura en el subsuelo de Sevilla alcanza el equilibrio térmico entorno a los 18 ºC a una profundidad de 10 metros, durante todo el año.

- Si existe demanda de refrigeración y calefacción simultánea o sucesiva, se puede cargar térmicamente el terreno cuando los requerimientos sean de frio y descargarlo cuando sean de calor, o ambos simultáneamente.

- Es efectivo independientemente del clima.

Como inconvenientes podemos citar:

- La dificultad añadida, tanto económica como de recursos para introducir tubos en un terreno, ya sea construido o sin edificar.

- Necesidad de un espacio bastante amplio para poder ceder la energía térmica necesaria, siendo ésta mayor si la disposición de los tubos se realiza en horizontal.

- El consumo eléctrico asociado a las bombas que mueven los distintos fluidos con los que trabaja la instalación, es superior al de los casos anteriores debido a la gran pérdida de carga introducida por los tubos enterrados.
- Las limitaciones legales para la geotermia existentes en España, y en concreto, la que impide saturar el terreno de titularidad ajena a la propia. Como consecuencia de lo anterior, se habrá de disponer de medios físicos para evitar el trasvase de energía a terrenos ajenos.

- El terreno es un medio que posee una inercia térmica importante, y cuyas propiedades termofísicas relacionadas con el almacenamiento de energía y la transferencia de calor dependen de muchas variables, como composición y compacidad del terreno, posible existencia de capa freática, etc. Por ello, el estudio completo del problema adquiere una gran complejidad.

En este Proyecto Fin de Carrera, se ha prestado especial atención a la última configuración de cesión de calor comentada, desde el punto de vista de la modelización del terreno y su respuesta, al ser sometido a una excitación térmica.