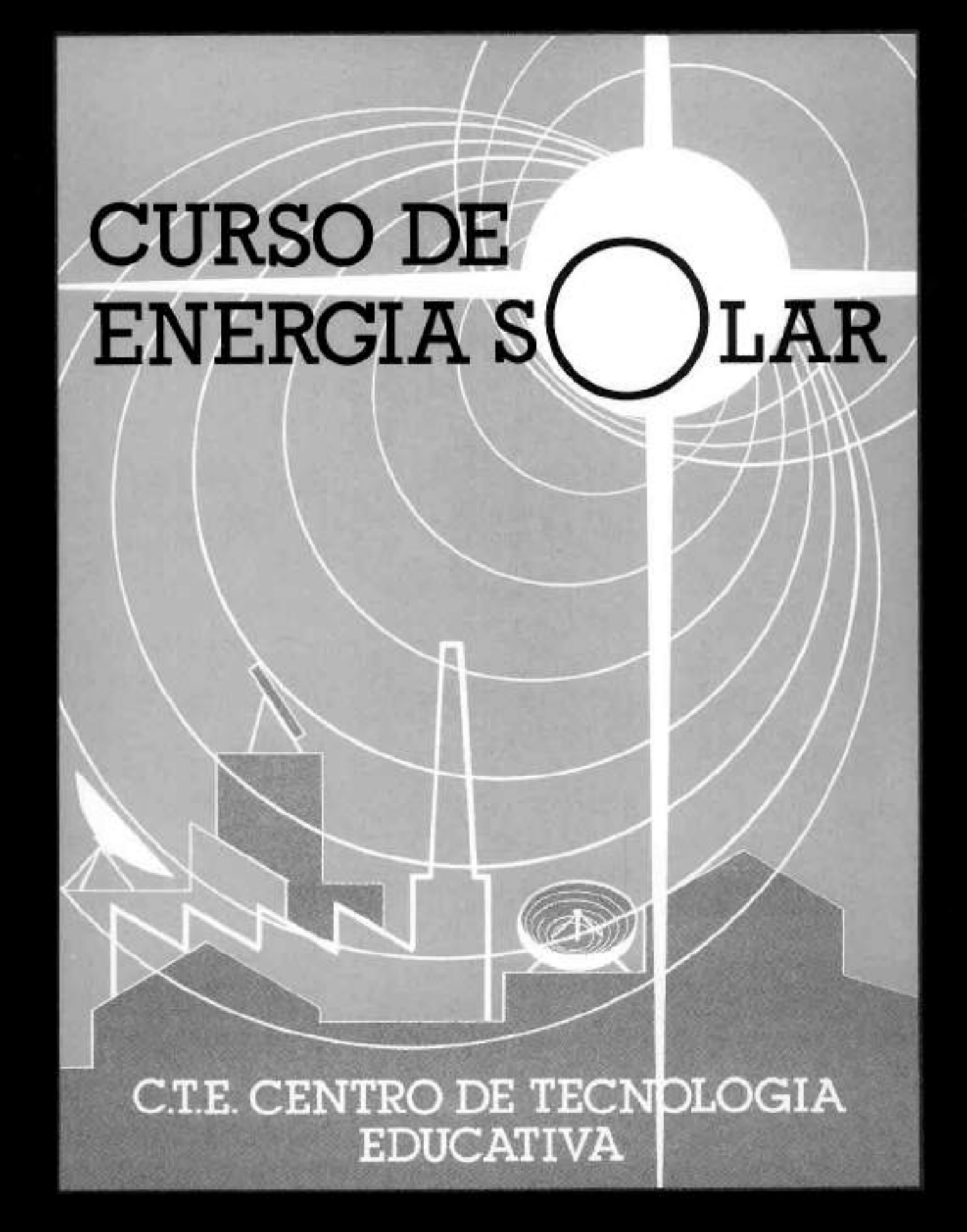




CURSO DE ENERGIA SOLAR

C.T.E. CENTRO DE TECNOLOGIA
EDUCATIVA

**CURSO
DE
ENERGIA
SOLAR**

TOMO 5

ENERGIA SOLAR

El presente Curso de Energía Solar, especialmente pensado para la enseñanza a distancia, ha sido desarrollado por el siguiente equipo de profesionales:

- **Textos:** Jaume Ribot i Martín, *Ingeniero Industrial, ex profesor de la Universidad Politécnica de Barcelona, miembro de ISES (International Solar Energy Society).*
- **Dibujos:** Antonio Escuder Torres.
- **Ilustraciones humorísticas:** Pere Rovira Castellà y Jordi Sempere.
- **Fotografías:** Jaume Ribot y archivo de CTE.
- **Maquetación y montaje:** Roser Quinquillà Pedro.
- **Supervisión didáctica:** José L. Barón Sesé.

© CTE-Centro de Tecnología Educativa, S.A.
Via Augusta, 4, 6ª planta.
08006 Barcelona.

Segunda edición, marzo 1995.
ISBN Obra completa: 84-7608-054-9.
ISBN Tomo 5: 84-7608-090-5.
D.L.: B-8023-1995.

Impreso en Imprimeix, S. Coop. Ltda.
C/ Eduardo Maristany, 100. Badalona (Barcelona) ESPAÑA.

Reservados los derechos para todos los países.
Se prohíbe la reproducción total o parcial.

SUMARIO

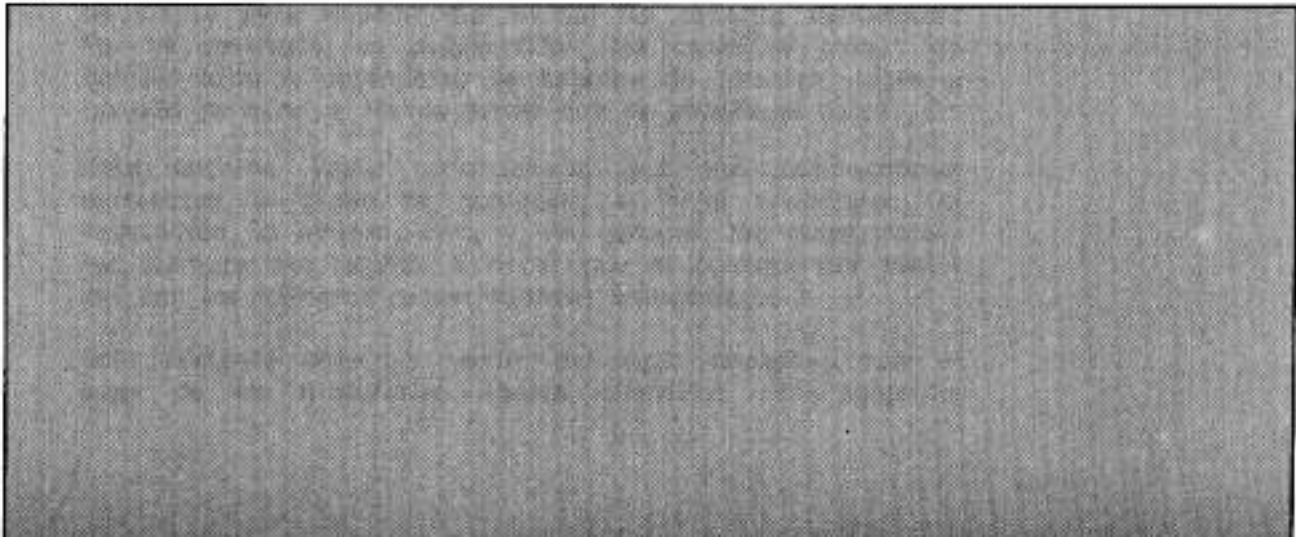


	<u>Pág.</u>
Lección 19. La Arquitectura solar pasiva. Concepto de Arquitectura solar pasiva. Efecto de la orientación de las fachadas. Criterios de construcción. El muro Trombe. Ceras solares.	5
Lección 20. Datos para un estudio de calefacción. Condiciones ambientales de habitabilidad. Grados-día. Coeficientes K. Infiltraciones de aire. Cálculo del consumo de calefacción de un edificio. Datos de interés.	21
Lección 21. Descripción de una instalación de calefacción por energía solar. Descripción de los diferentes sistemas de calefacción. Calefacción por suelo radiante. Calefacción por convectores. Calefacción por aire caliente con "fan-coils". Calefacción por aire con almacenamiento de calor en grava. Equipos de control.	39
Lección 22. Cálculo de una instalación de calefacción por energía solar. Planteamiento del problema. Método F-CHART para aire. Ejemplo de aplicación. Datos de interés.	57
Lección 23. La bomba de calor por energía solar. Fundamento de la bomba de calor. Bomba de calor por compresión. La bomba de calor por absorción. Funcionamiento general de las bombas de calor. Datos de interés.	79





LECCION 19





19. LA ARQUITECTURA SOLAR PASIVA

INTRODUCCION

El diseño de un edificio es muy importante para el futuro confort de sus usuarios. Además, si se diseña con criterios solares, se pueden conseguir grandes ventajas dado el carácter pasivo y estático de la edificación.

CONCEPTO DE ARQUITECTURA SOLAR PASIVA

Los edificios, en todo el planeta, se construyen, entre otras cosas, para que las personas puedan guarecerse de las inclemencias exteriores. Esto es válido tanto para una zona desértica, donde interesará resguardarse del ardiente sol diurno y de las temperaturas elevadas, como en zonas frías, en las que se utilizarán los edificios para protegerse del intenso frío.

Vemos que en cualquier lugar de la tierra existe un entorno que condiciona la forma tradicional de construcción. Las casas de los países cálidos se pintan exteriormente de blanco para impedir que el Sol las caliente demasiado. Por el contrario, en países fríos, las casas se pintan de colores oscuros dotándolas de tejados de pizarra negra y gruesas paredes, a fin de evitar que se escape el calor.

Este entorno viene condicionado por las temperaturas existentes, el grado de humedad, el nivel económico, la vegetación, la altitud, etc., y, en general, las construcciones siempre han tendido a hacer que el confort sea máximo con los mínimos requerimientos energéticos.

Sólo recientemente -a partir del siglo pasado-, con el auge de los materiales ligeros (ladrillos con agujeros,

grandes superficies acristaladas, etc.), las construcciones han ido aligerándose, y así las gruesas paredes de piedra —excelentes aislantes del calor y del frío— han sido sustituidas por paredes de mampostería de ladrillo hueco, pilares de hormigón armado y grandes cristalerías, con lo que el calor y el frío pueden pasar a través de ellas con mucha más facilidad.

Pero, además, la sustitución de la construcción pesada por la ligera ha tenido otro efecto: ha disminuido considerablemente la **inercia térmica** del edificio.

En efecto, un edificio pesado, con gruesas paredes macizas, mantiene prácticamente una temperatura constante en su interior debido a que durante el día el calor que reciben del Sol sus paredes y cubiertas tarda mucho en atravesarlas, y lo mismo ocurre durante la noche respecto al enfriamiento. Por el contrario, un edificio ligero presenta fuertes variaciones de temperatura en su interior a lo largo de las 24 horas del día, lo que hace que el grado de confort sea inferior (Fig. 1).

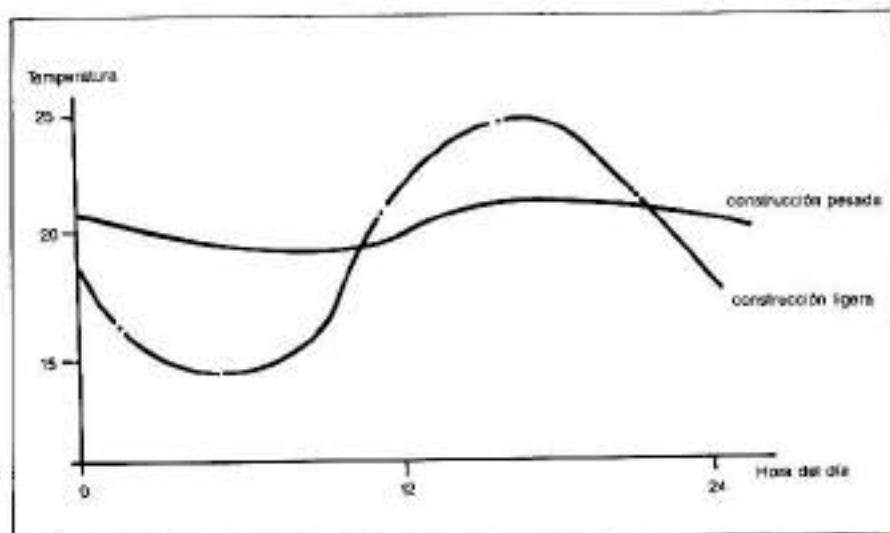


Fig. 1.— Temperatura ambiente en el interior de un edificio.

Con los datos del entorno se pueden diseñar construcciones que sean sumamente confortables, ya que estarán adecuadas a aquél. Además, intervienen una serie de factores, tales como la colocación de las ventanas y su extensión, las dimensiones del edificio, su orientación, etc., de forma que se aproveche del modo más conveniente la energía solar de manera **pasiva**, es decir, sin la presencia de **aparatos** mecánicos, paneles solares o líquidos en circulación. De ahí que pueda hablarse de una **Arquitectura solar pasiva**.

EFECTO DE LA ORIENTACION DE LAS FACHADAS

La orientación de las fachadas es un aspecto importante, especialmente en latitudes altas, pues los rayos del Sol inciden en ellas según su orientación con mayor o menor intensidad, lo que se deberá tener en cuenta a la hora de hacer la distribución de las distintas habitaciones interiores y de sus ventanales (no es lo mismo una sala de estar que el cuarto de baño). Veamos las características de distintas orientaciones (Fig. 2).

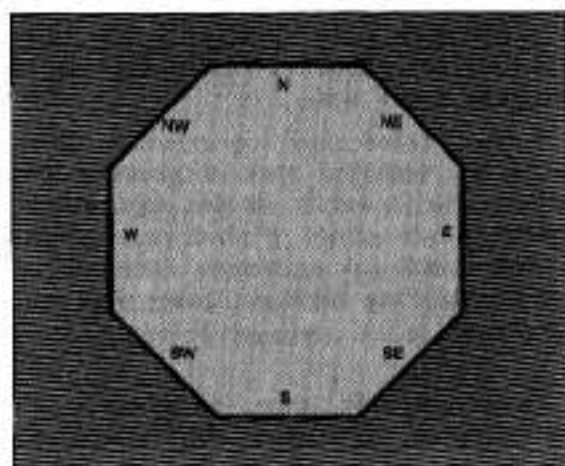


Fig. 2.— Distintas orientaciones de las fachadas de un edificio.

NORTE: La orientación norte es la más fría y en ella sólo da el sol en las primeras horas de la mañana y las últimas de la tarde en verano. Durante el resto del año, permanece siempre en la sombra.

NORDESTE: En la orientación nordeste, el sol incide perpendicularmente al salir por las mañanas de verano, aunque debido a la poca altura que tiene sobre el horizonte, la energía aportada a la fachada es pequeña. A lo largo del verano, durante la primera mitad de la mañana recibe sol, mientras que en invierno permanece siempre en la sombra.

ESTE: Recibe el sol por la mañana, en verano de forma bastante intensa y en invierno no tanto, debido a que en verano inciden los rayos del sol perpendicularmente a ella a media mañana, cuando el sol ya está alto sobre el horizonte,



mientras que en invierno el sol sale por el sudeste e incide con cierta inclinación.

SURESTE: La orientación sureste es **una de las mejores**, pues recibe el sol por las mañanas, de forma oblicua en verano y perpendicular en invierno, insolación que continúa hasta las primeras horas de la tarde. Dado que durante la noche el edificio se enfría, el recibir los rayos del sol por la mañana es beneficioso para conseguir un rápido calentamiento inicial del edificio, que sin embargo no continúa por la tarde. La orientación sureste es la que da una temperatura más uniforme.

SUR: Es la mejor orientación. En invierno le da el sol durante todo el día, con la ventaja de que a causa de la poca altura que tiene sobre el horizonte, incide bastante perpendicularmente, mientras que en verano no le da el sol a primera hora de la mañana y a la última de la tarde y debido a la gran altura del sol sobre el horizonte, los rayos solares inciden oblicuamente sobre ella.

SUROESTE: Es similar a la sureste, pero algo peor debido a que el sol incide sobre ella a partir de las últimas horas de la mañana y durante toda la tarde. Debido a que por la mañana el sol ha ido calentando el ambiente (edificio, aire, etc.), esta orientación proporciona temperaturas más extremas que la sureste.

OESTE: Es similar a la orientación este, pero como en el caso de la orientación suroeste, el fuerte calentamiento del día, especialmente en verano, hace que el sol incida sobre ella (en verano) a media tarde de forma perpendicular, **calentándose considerablemente**, mientras que las mañanas, al tener siempre sombra, son muy frías. En invierno incide el sol oblicuamente por la tarde. En instalaciones de aire acondicionado, las habitaciones con ventanas al oeste son las que requieren mayor potencia frigorífica.

NOROESTE: Es una orientación **desfavorable**, pues todas las ventajas de la orientación sureste son ahora inconvenientes. En invierno no recibe el sol, con lo que es muy fría, mientras que en verano, a última hora de la tarde, el sol incide de lleno sobre ella, calentándose fuertemente.

De lo anteriormente expuesto se desprende que en **países cálidos** interesará el poder disponer de orientaciones **norte, nordeste y este**, mientras que en **países fríos** serán preferi-



bles las orientaciones **sureste, sur y suroeste**. En general, las orientaciones con componente Este son preferibles a sus homólogas con componente Oeste, por el hecho de que la componente Este tiende a **suavizar** las temperaturas del día y de la noche, mientras que la componente Oeste tiende a **extremar** ambas temperaturas.

CRITERIOS DE CONSTRUCCION

La construcción de edificios basada en la Arquitectura solar pasiva presenta una serie de características propias que los hacen un poco diferentes al resto de edificios. En general, ello conlleva un cierto incremento de precio del edificio, pero casi siempre este aumento de precio se ve compensado por importantes ahorros en calefacción y por un mayor confort interior.

En primer lugar, un edificio construido bajo estos criterios estará **convenientemente orientado** en su fachada principal respecto a una dirección adecuada, y la distribución de las habitaciones y de sus ventanas se hará conforme a estos criterios. Así, los cuartos de estar interesa que sean soleados, mientras que se puede prescindir del sol en cuartos de baño, cocinas, etc. Los dormitorios pueden tener distintas orientaciones.

Una vez el edificio esté correctamente orientado, conviene que tenga la **mínima superficie exterior**. Esto se logra haciendo que el edificio presente el mínimo de entrantes y salientes, y se ajuste a una forma exterior preferentemente rectangular, con uno de los lados mayores orientado a la dirección preferida. Una excesiva superficie lateral hace que el edificio pierda o absorba calor con más eficacia, lo que motiva que las temperaturas interiores oscilen demasiado durante las 24 horas del día.

El edificio se construirá con paredes exteriores **gruesas**, o bien provisto de abundante aislante térmico, en caso de utilizar paredes normales de mampostería; asimismo se **separará** el piso inferior del terreno para evitar las pérdidas de calor. (En el caso de tener sótano, esto no es necesario) (Fig. 3).

Los ventanales del edificio se realizan con dimensiones adecuadas, de acuerdo con el tipo de estancia y con la



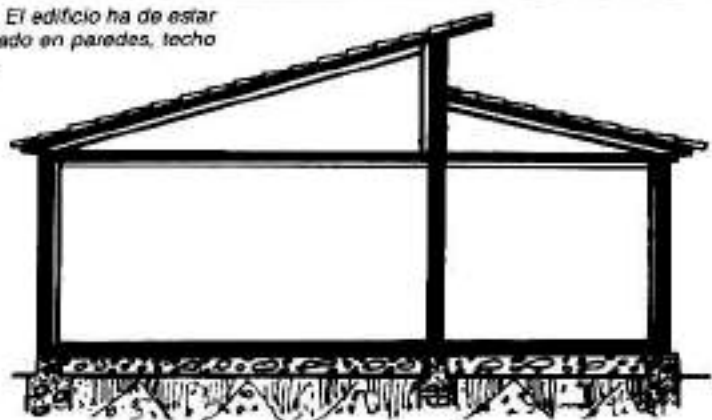
orientación, de forma que se pueda controlar la entrada de energía. Asimismo, se colocarán **persianas** -siempre **exteriores** al cristal- que sean graduables, pudiendo éstas quedar entreabiertas.

Las ventanas serán de **doble vidrio** en regiones frías (Fig.4).



Fig. 4.— Ventana de doble vidrio.

Fig. 3.— El edificio ha de estar bien aislado en paredes, techo y suelo.



Encima de las ventanas, balcones, etc, puede ser conveniente la presencia de **aleros**, que hacen sombra en verano y no impiden el paso del sol en invierno a resultas de las diferentes alturas del sol sobre el horizonte. La orientación óptima de los aleros es la **sur**, pero con la **sureste** y **suroeste** también son efectivos. (Aleros colocados en orientaciones que no tengan componente sur son ineficaces).

Los **terrados** o **tejados** no deben descuidarse, puesto que deben estar, al igual que las paredes exteriores, bien aislados térmicamente, siendo en los **terrados** preferible el forjado catalán al **terrado** sencillo. De la inclinación y orientación de los **tejados** depende el grado de **insolación** que reciban. Los **tejados** pueden orientarse a los cuatro vientos, a dos lados o a un lado (Fig. 5).

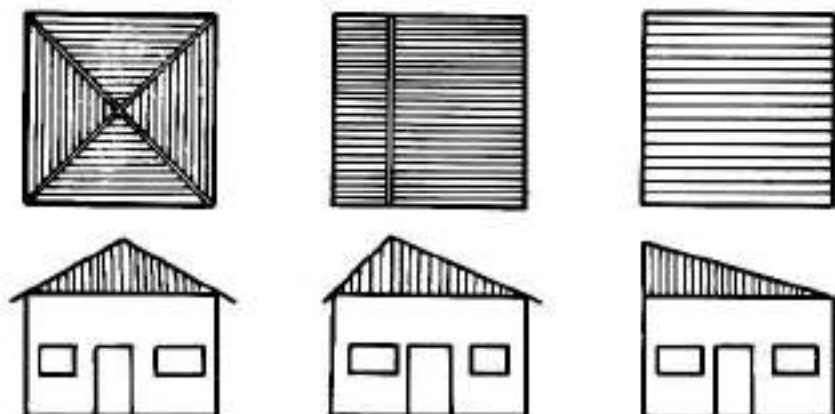


Fig. 5.— Tejados inclinados a cuatro vientos, a dos y a uno.

Una orientación a los cuatro vientos tiene un efecto suavizante debido a que las temperaturas en la buhardilla bajo el tejado tienden a homogeneizarse, compensándose las aportaciones de calor que recibe el trozo de terrado orientado al sur con el orientado al norte y lo mismo pasa respecto a los orientados al este y oeste.

La orientación del tejado a dos lados es bastante indiferente si está orientado según la dirección norte-sur o este-oeste, excepto para el caso de tejados con mucha pendiente, donde es preferible la orientación norte-sur.

La orientación del tejado en una dirección (generalmente la sur), es propia de zonas frías. También puede orientarse hacia el norte en zonas cálidas y hacia el este en zonas templadas. La orientación hacia el oeste es desaconsejable, debido al intenso calentamiento en verano.

Según interese captar más o menos energía solar, los tejados se **inclinan** más o menos, al igual que si fueran un panel solar.

Finalmente, según el **color** de los mismos, pueden captar más o menos energía solar, existiendo desde la teja árabe de arcilla clara, pasando por arcilla roja y negra, hasta tejas machihembradas o placas de pizarra negra, etc.

Las **chimeneas**, en general, deben **evitarse**, pues como medio de calefacción son altamente ineficientes ya que casi todo el calor que producen se pierde con los humos. Además, cuando no funcionan producen un **tiro**, que si bien en pequeñas cantidades es beneficioso pues renueva el aire del edificio, si es excesivo puede hacer que en invierno el aire caliente del interior escape por la chimenea, siendo reemplazado por aire frío.

La presencia de **claraboyas** es recomendable, proporcionando una distribución uniforme de la luz dentro de la estancia que la hace muy agradable en cuanto a habitabilidad.

Los **invernaderos** o las **galerías acristaladas** se utilizan preferentemente en climas fríos y sirven para mantener una zona de la casa más caliente (Fig. 6).

En general, estos invernaderos suelen estar adosados a la fachada sur del edificio y se utilizan para cultivar plantas en su interior. Pueden ser relativamente pequeños y estéticamente agradables. Si se practican unos orificios en la



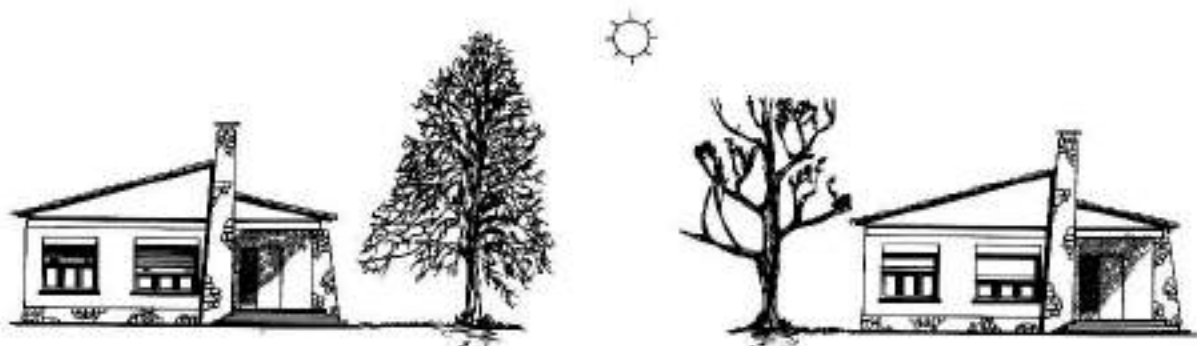
pared del edificio, podemos hacer que el aire caliente que hay en su interior pase al edificio, con lo que tendremos un sistema barato de calefacción.

Fig. 6.— Invernadero adosado a la fachada Sur.



Otro aspecto a tener en cuenta es la **vegetación**. En general, los árboles de hoja caduca deberemos situarlos en la parte sur del edificio, puesto que en verano nos taparán el sol, mientras que en invierno, al no tener hojas, dejarán pasar libremente los rayos del sol. Por el contrario, los árboles de hoja perenne* los situaremos en la parte norte, donde su sombra no molestará (Fig. 7).

Fig. 7.— Vegetación de hoja caduca en verano y en invierno.



* Se entiende por árboles de hoja caduca aquéllos cuyas hojas caen en el otoño y brotan nuevamente en la primavera, renovándose de año en año, como el naranjo, el tío y los frutales en general. Son árboles de hoja perenne los que mantienen sus hojas durante las cuatro estaciones del año, por ejemplo, el ciprés, el abeto, la palmera, el pino y, en general, las coníferas.

EL MURO TROMBE

Recibe el nombre de muro Trombe (en honor a M. Trombe, que fue quien lo diseñó en una casa situada en Font Romeu, en el sur de Francia), un tipo de colector solar para aire integrado en la propia fachada del edificio.

Este tipo de colector consiste en un muro de gran grosor y convenientemente aislado térmicamente. La razón de su grosor y aislamiento es la de impedir el paso del calor a través del mismo hacia el interior del edificio.

La fachada se pinta de negro y se colocan unos cristales a unos 10-15 cm. de la pared. En la parte inferior se practican unos orificios que atraviesan el muro y en la superior otros adicionales.

De esta forma, el conjunto se comporta como un panel solar de aire, funcionando por circulación natural. El aire del edificio entra al colector a través de los orificios inferiores, se calienta y vuelve al edificio por medio de los orificios superiores (Fig. 8).

Este sistema resulta especialmente apropiado en invierno, que es cuando los rayos del sol inciden de forma casi perpendicular a la fachada sur. No obstante, debido a que el aire caliente tiene tendencia a situarse en la parte superior de las habitaciones, resulta más eficaz que el conducto superior de entrada de aire caliente penetre por la parte inferior a nivel del suelo. Esto no puede conseguirse con edificios de una sola planta baja, pero sí con edificios de varias plantas, colocando los colectores Trombe entre una planta y otra (Fig. 9).

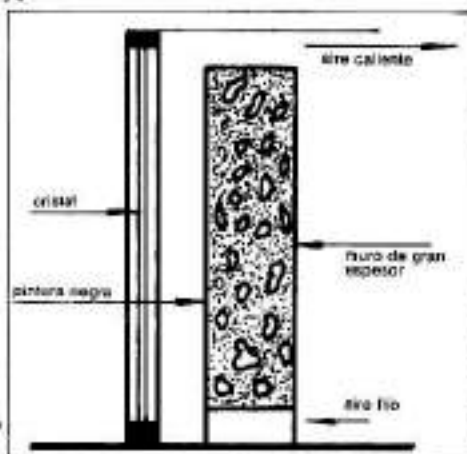


Fig. 8.— Colector solar «Muro Trombe».

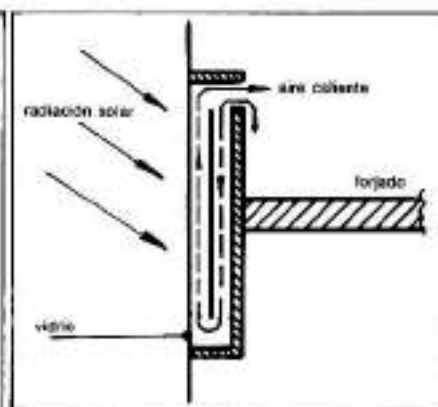


Fig. 9.— Muro Trombe integrado en el edificio.

El muro Trombe admite muchas **variantes**. Una de ellas es situar una placa metálica (preferiblemente con aletas o rugosidades) y hacer circular aire, de forma que éste recorra hacia abajo la parte posterior y hacia arriba la parte delantera. El aire así calentado puede entrar en la habitación a la altura de 1 m., pudiendo entonces colocarse una ventana. Los nuevos colectores Trombe se sitúan entre ventana y ventana, siendo este sistema de calefacción ideal para edificios acristalados, en los cuales la adopción del muro Trombe supone un incremento muy pequeño de precio del edificio (Fig. 10).

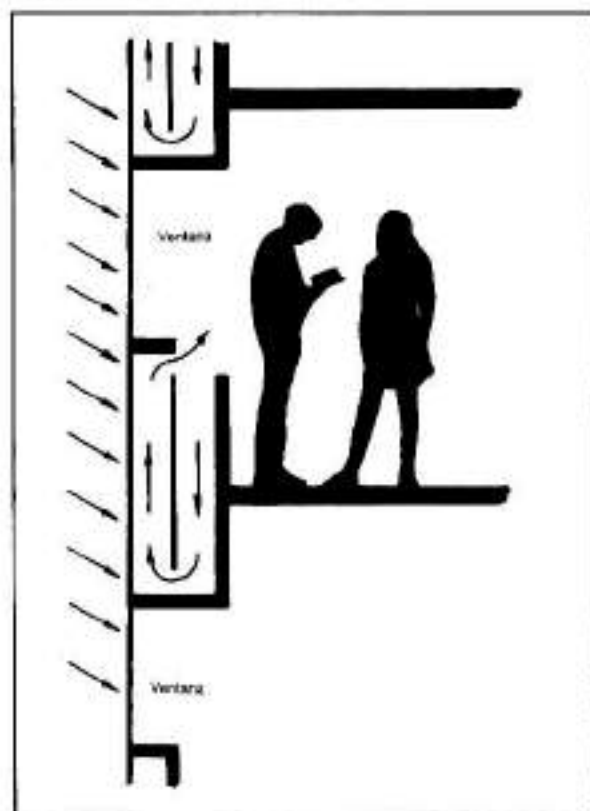


Fig. 10.— Colectores solares en edificios acristalados.

Hemos dicho antes que convenía que el muro Trombe estuviera bien aislado térmicamente para impedir el calentamiento de la pared interior. A veces, es precisamente este efecto el deseado y el muro hace de acumulador de calor. En estos casos se suele llenar el muro de recipientes con agua, herméticamente cerrados. Debido al elevado calor específico del agua, ésta absorbe y cede calor con gran lentitud, por lo que el muro se mantiene frío durante el día (proceso de carga) y caliente por la noche (proceso de descarga de energía). Este tipo de muros, llamados **muros solares**, son interesantes en zonas áridas, donde debido a la escasa hume-

dad relativa del aire, las temperaturas de día son muy altas, mientras que de noche se pueden estar a varios grados bajo cero (Fig. 11).

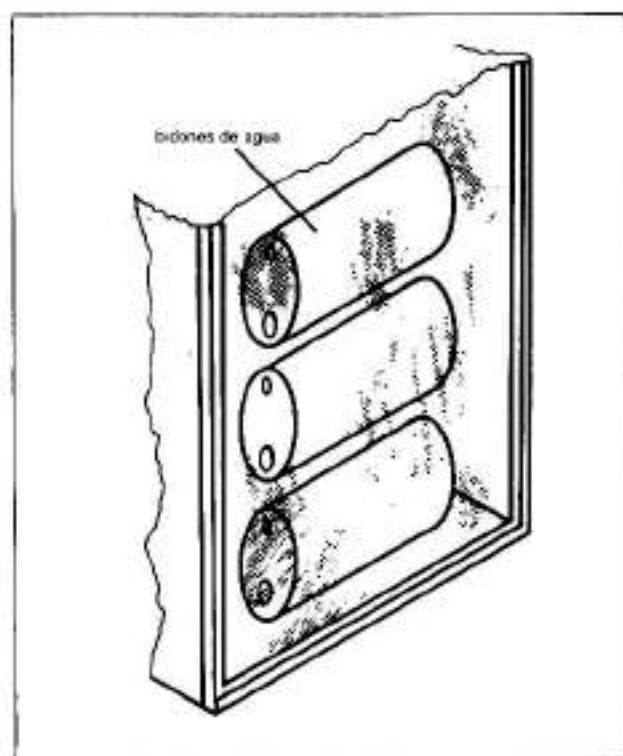


Fig. 11.— Muro solar.

Pero el muro Trombe tiene también otras aplicaciones. Si lo dotamos de unos orificios superiores que comuniquen al exterior, cerramos el conducto que atraviesa el muro en su parte superior y abrimos un orificio en la fachada norte del edificio, podremos disponer de una saludable **aireación fría**. Ello es así puesto que el colector Trombe fuerza, al calentar el aire, a que salga por la parte superior del mismo perdiéndose en la atmósfera. Pero este aire que sale, precisa que entre otro por la parte inferior a través del conducto situado debajo que atraviesa el muro; es aire nuevo en igual volumen. Esta entrada de aire succiona aire frío, situado en la fachada norte, con lo que se establece una circulación de aire frío por el edificio, que lo puede enfriar hasta el límite de la temperatura del aire en la fachada norte (Fig. 12).

Si no se desea tener ningún efecto ni calefactor ni enfriador, basta con abrir unos orificios en la parte inferior del colector Trombe y otros en la superior, cerrando los orificios que atraviesan el muro. De esta forma, se establecerá una corriente de aire que entrará en el muro

Trombe por la parte inferior y saldrá calentado por la parte superior hacia la atmósfera, sin más consecuencias.

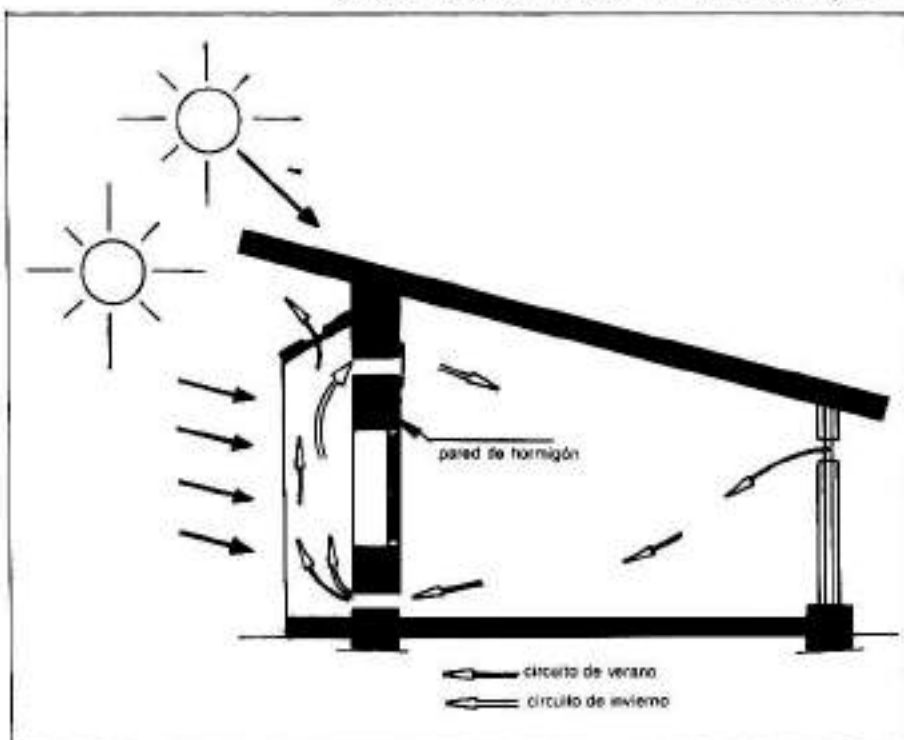


Fig. 12.— Funcionamiento de un Muro Trombe en verano e invierno.

Como se ve, un edificio dotado de muro Trombe requiere un sistema de conductos, conductos que pueden estar abiertos o cerrados. Esta operación puede hacerse manualmente, accionando una trampilla que permita o cierre el paso del aire, según convenga, o automáticamente con un conjunto de electroimanes, válvulas neumáticas, etc. controlados por termostatos de ambiente.

CASAS SOLARES

Reciben el nombre de **casas solares** algunas casas que se construyen generalmente con fines experimentales y que suelen poseer sistemas de aporte de energía solar muy importantes, los cuales son capaces de independizarlas, energéticamente hablando, de toda clase de compañías eléctricas, de gas, etc.

Estas casas suelen estar construidas de acuerdo con los principios anteriormente expuestos de la Arquitectura Solar Pasiva (grandes aislamientos, empleo de muros Trombe, etc.), pero tienen **sistemas activos** (instalaciones de

energía solar) que les proporcionen agua caliente, calefacción, electricidad, aire acondicionado, etc.

Estas casas tienen, comúnmente, sistemas de **recuperación de calores residuales**. Tal es el caso de las estufas de leña, a las que se puede dotar fácilmente de un haz de tubos que sirva para calentar agua como aporte extra de la instalación solar.

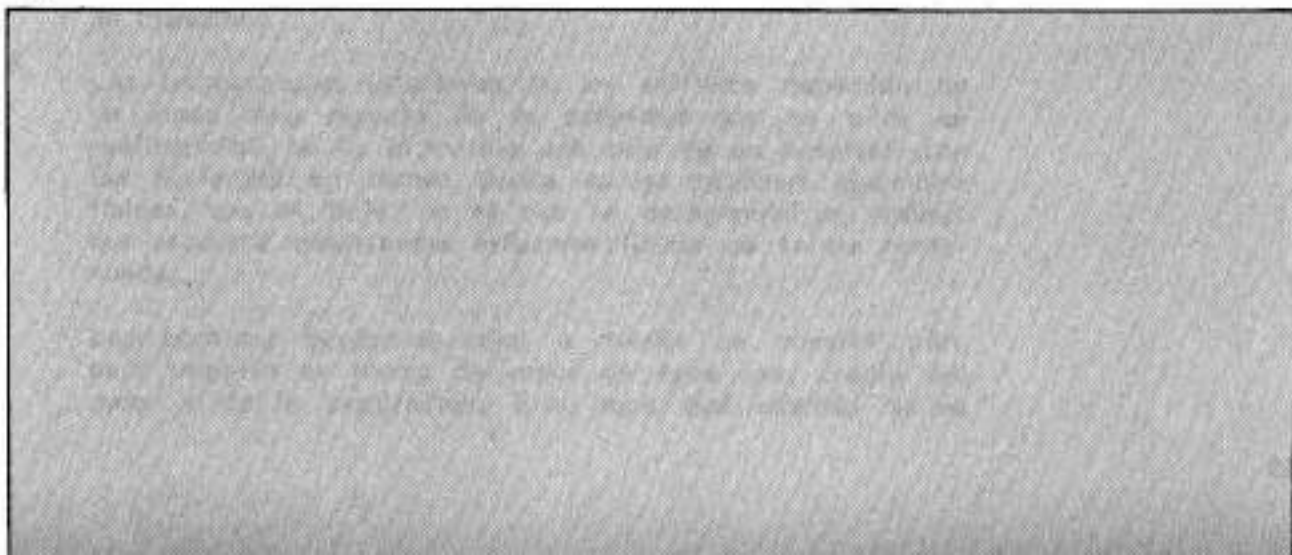
Otra aplicación en edificios de oficinas dotados de muro Trombe consiste en recuperar calor de todas las luminarias, con lo que cada equipo de lámparas fluorescentes, además de estar conectado a la red eléctrica, se conecta a un circuito de líquidos que extrae el calor de los mismos.

Este calor, junto con el procedente de otras fuentes, puede hacer funcionar una bomba de calor o una máquina frigorífica que acondicione el aire del edificio.

Como se observa, las aplicaciones de la energía solar son importantes, y en estas casas solares se pretende investigar la viabilidad de la energía solar en múltiples aspectos, no ya como aporte suplementario a las energías tradicionales sino como sustituto total de las mismas.



LECCION 20





20. DATOS PARA UN ESTUDIO DE CALEFACCION

INTRODUCCION

En esta lección examinaremos una serie de conceptos necesarios para poder realizar un estudio de calefacción de un edificio, con la finalidad de poder posteriormente aplicar estos mismos conceptos en instalaciones de energía solar.

CONDICIONES AMBIENTALES DE HABITABILIDAD

La sensación de bienestar es algo sumamente subjetivo que varía de un individuo a otro, debido a múltiples causas, tales como la actividad que se realiza, la que se había realizado inmediatamente antes, la temperatura a la que se había estado expuesto con anterioridad, el hecho de estar en plena digestión, etc., etc.

A pesar de todas estas variaciones, generalmente para un edificio existe una estrecha gama de temperaturas en las cuales la inmensa mayoría de individuos tiene una sensación de bienestar.

Las temperaturas interiores de los edificios dependen de un modo muy directo de la actividad que en ellos se realice. Así, no es lo mismo una sala de un hospital, con los pacientes en camas donde no se realizan ejercicios físicos, que un taller en el que se desempeña un trabajo que requiera importantes esfuerzos físicos de forma continuada.

Las personas perdemos calor a través de nuestra piel, pero también en forma de vapor de agua, por medio del sudor y de la respiración. Ello hace que además de la



temperatura ambiente sea importante el grado de **humedad relativa**. Con la misma temperatura suele tenerse una mayor sensación de calor si la humedad es elevada. Esto se debe a que el agua que transpiramos a través de la piel no puede evaporarse fácilmente de ella (a igualdad de temperatura, la velocidad de evaporación de agua es inversamente proporcional a la humedad relativa, hasta el extremo que en condiciones del 100% de humedad relativa no existe evaporación). Como se sabe, el agua al evaporarse absorbe una cantidad importante de calor. Un Kg. de agua al evaporarse absorbe 2,67 MJ.

Otro factor, aparte de los ya mencionados de temperatura y humedad, es la **velocidad** del aire. Generalmente, en el interior de edificios esta velocidad del aire es casi nula y tan sólo es apreciable en las proximidades de ventanas abiertas, pasillos o conductos de distribución de aire caliente o acondicionado. Una cierta velocidad del aire favorece la evaporación del agua de la piel y la convección de calor, por lo que da una sensación de menor temperatura.

Para el caso de edificios destinados a viviendas, oficinas, etc. y, en general, a actividades que no requieran un especial esfuerzo físico, las condiciones óptimas son de alrededor de unos 20° C y un 60% de humedad relativa.

Las condiciones de humedad suelen ser difíciles de controlar, pero suelen oscilar entre el 50 y el 70% en el interior de edificios, dependiendo de la región donde se esté. Además, el yeso del enlucido, cortinas, alfombras, muebles, etc. absorben y ceden humedad según ésta sea alta o baja, con lo que las oscilaciones de humedad en el interior de un edificio son pequeñas.

El factor más importante que afecta al grado de bienestar de un edificio es la **temperatura ambiente** interior. Ya vimos en la lección precedente que la inercia térmica del edificio hace que la oscilación de temperaturas dentro del mismo sea pequeña. Esto hace que la temperatura ambiente media diaria en un edificio no habitado se aproxime a la temperatura media mensual de la zona donde está situado.

Dado que las pérdidas de calor de un edificio dependen fundamentalmente de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, se comprende que cualquier estudio de calefacción debe incluir como dato fundamental la temperatura media mensual. Esta temperatura se puede

dar directamente, o bien en forma de los llamados "grados-día".

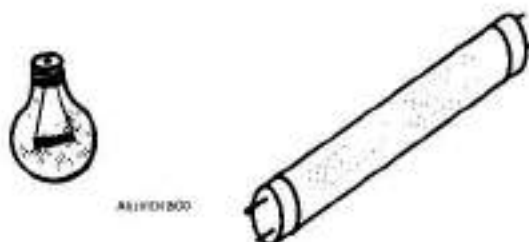
GRADOS DIA

Los **grados-día** es la diferencia entre 15°C y la temperatura media del día (la temperatura media del día, en general, se tomará igual a la temperatura media mensual). Si la diferencia entre 15°C y la temperatura media mensual del mes considerado es menor que cero (la temperatura media mensual es mayor de 15°C), el número de grados-día se toma como cero.

Así, por ejemplo, si la temperatura media mensual en un determinado lugar y para un mes concreto es de $10,5^{\circ}\text{C}$, el número de grados-día es de: $15 - 10,5^{\circ}\text{C} = 4,5^{\circ}\text{C}$. Por el contrario, si en otro mes la temperatura media mensual es de $17,5^{\circ}\text{C}$, el número de grados-día es 0, puesto que la diferencia entre 15 y $17,5^{\circ}\text{C}$ es negativa.

Cabe preguntarse la razón por la que se ha elegido 15°C y no 20°C como base de la definición de los grados-día. Ya dijimos que las pérdidas de calor de un edificio dependen de la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior. De acuerdo con esta definición, parecería más lógico definir los grados-día como la diferencia entre 20°C (o la temperatura interior que hayamos elegido) y la temperatura media mensual.

Esto no es así por la sencilla razón de que en el interior del edificio existen **otras fuentes de calor**, que son por sí mismas suficientes para elevar la temperatura unos 5°C . Tales fuentes están constituidas por las **propias personas** (que para actividades normales que no requieran esfuerzos físicos, generan una potencia de 150 W) las **luminarias**, los **fuegos de la cocina**, el calor que se desprende de los propios **electrodomésticos**, etc. (Fig. 1).



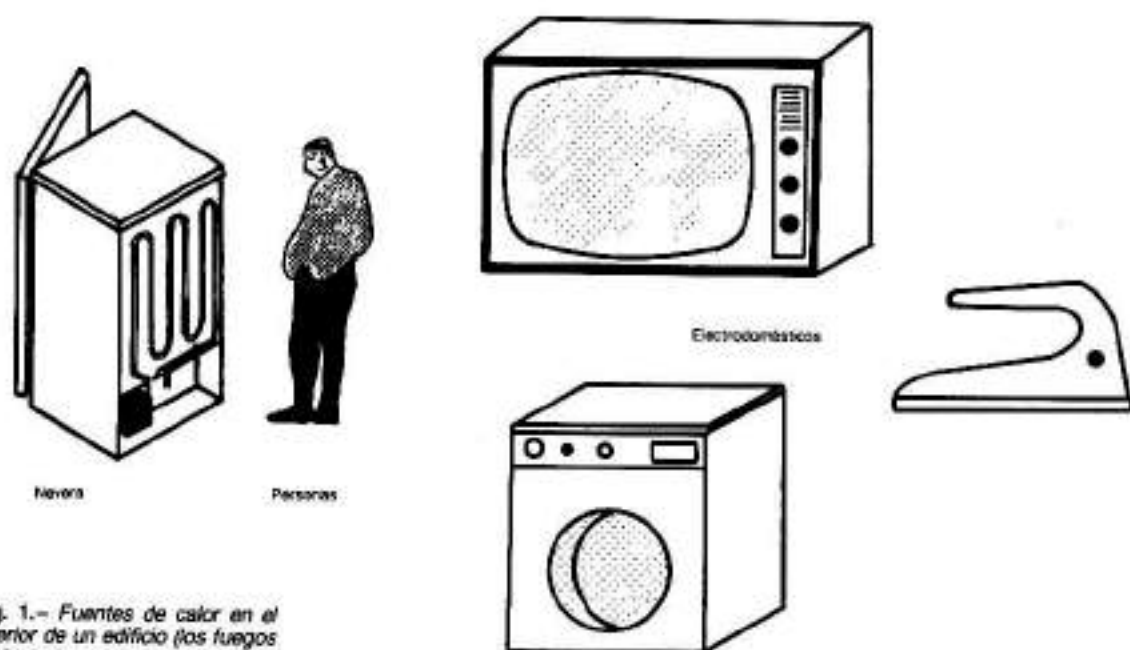


Fig. 1.- Fuentes de calor en el interior de un edificio (los fuegos de la cocina, el calor que se desprende de los propios electrodomésticos, etc.).

Además de esto, la presencia de ventanas y la costumbre de tener abiertas las persianas de día (en invierno) y cerradas durante la noche, hace que el interior del edificio reciba una aportación extra de energía que queda atrapada en su interior y que hace que aun sin ningún sistema de calefacción, la temperatura del interior del edificio sea algunos grados más alta que la temperatura media mensual. Esta es la razón por la cual para el cálculo de los grados-día se toma la temperatura de 15°C .

Para determinar el consumo de calefacción de un edificio, en base a los grados-día, basta multiplicar el número de grados-día por el producto de la superficie exterior y el coeficiente de pérdidas de calor.

La determinación de este producto de la superficie exterior del edificio por el coeficiente de pérdidas de calor es compleja, puesto que el edificio se compone de varias partes de las que, si bien su superficie puede conocerse con precisión, no sucede así con las pérdidas de calor de cada una de ellas. Sucederá, pues, que las pérdidas de calor serán notablemente diferentes en las fachadas, las ventanas, el techo o el suelo.

En general, el consumo de energía para calefacción será de:

$$L = U \cdot S \cdot GD$$

L = Consumo de energía.
 U = Coeficiente de pérdidas de calor.
 S = Superficie.
 GD = Número de grados-día.

En esta fórmula, según que el coeficiente de pérdidas de calor U esté referido a un día o a un mes, obtendremos el valor de la energía necesaria para calefacción referida a un día o a un mes.

Hemos dicho que el coeficiente de pérdidas de calor U es de compleja obtención. Si el edificio **no es nuevo** y se ha **usado calefacción** en él, entonces el producto de US puede determinarse fácilmente como:

$$US = \frac{N \times PC \times \mu}{GD}$$

N = Unidades de combustible (Kg, l, m³, Kw/h).
 PC = Poder calorífico J/Kg.
 μ = Rendimiento del calefactor.

El rendimiento del calefactor puede oscilar entre 0.5 y 0.6 para sistemas de combustibles (gas, gasóleo, etc.). Este valor es el del rendimiento **global** del sistema. La caldera o calentador, aisladamente, tiene un rendimiento algo más elevado). Para el caso de calefacción eléctrica, el rendimiento es de 1.

Ejemplo: En una vivienda en Barcelona se han gastado durante el mes de enero 100 m³ de gas natural en el sistema de calefacción, que tiene un rendimiento global del 60%. La temperatura media mensual en Barcelona durante el mes de enero es de 9.4° C. Hallar el producto del coeficiente de pérdidas de calor por la superficie durante un mes. El poder calorífico del gas natural es de 41 MJ/m³.

$$US = \frac{100 \text{ m}^3/\text{mes} \times 41 \text{ MJ/m}^3 \times 0.6}{(15 - 9.4)^\circ\text{C}} = 439.3 \frac{\text{MJ}}{\text{mes } ^\circ\text{C}}$$

Obsérvese que el coeficiente US es **propio** de este edificio en las condiciones en que está, que tanto puede ser una casa aislada con las cuatro fachadas y el techo expuestas a la intemperie, como integrada en un bloque de pisos, donde sólo presente una fachada al exterior. Naturalmente, de dos edificios de las mismas características, uno aislado

de otras edificaciones y otro integrado en un bloque de viviendas, el primero tendrá un producto US mayor.

COEFICIENTES K

Cuando el edificio es nuevo o bien cuando en uno ya construido ha de instalarse un sistema de calefacción, el coeficiente de pérdidas de calor U es desconocido, por lo que se precisa determinarlo aunque sea de forma aproximada con el fin de establecer las necesidades de calefacción del mismo.

Ahora bien, las pérdidas de calor que sufre un edificio son complejas, ya que pierde calor por conducción a través del suelo y cimientos, y por conducción y convección a través de las paredes y cubierta. Las pérdidas por radiación son pequeñas, debido a que los edificios no se calientan excesivamente.

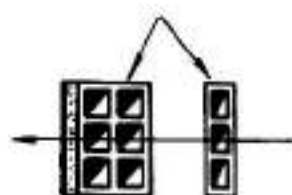


Fig. 2.— Paso del calor a través de varios materiales de construcción.

Pensemos en las pérdidas de calor a través de una pared sencilla (sin cámara de aire). Hay tres materiales distintos de dentro a fuera: yeso, ladrillo y cemento (revocado exterior) de distintos coeficientes de transmisión de calor por conducción. Además, las pérdidas de calor dependerán de la **convección**, que se verá afectada por la presencia de vientos, rugosidad, etc. El cálculo del coeficiente de pérdida de calor resulta por lo tanto, muy complejo (Fig. 2).

Se llama **coeficiente de pérdidas de calor, K** , a la cantidad de calor que transmite la unidad de superficie (1 m^2) de un material de construcción en la unidad de tiempo. Este coeficiente de transmisión de calor tiene en cuenta todas las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación.

Los **coeficientes K** se encuentran tabulados por los materiales de construcción más usuales o combinaciones de éstos, tales como paredes de ladrillo de diversos espesores, con o sin cámara de aire, cristales, tejados, suelo, etc. Para el caso de que no exista el tipo de pared concreto, el coeficiente K puede obtenerse como el inverso de la suma de inversos de los distintos coeficientes K de las capas que lo componen.

De hecho, los **coeficientes K** para el caso de **conducción** de calor son iguales al coeficiente de conductividad térmica.

ca del material dividido por el espesor.

Ejemplo: Calcular el coeficiente K de una pared formada, de interior a exterior, por una capa de yeso de 1 cm, una pared de ladrillo de tres agujeros, una cámara de aire de 10 cm de espesor, dos capas de ladrillos de seis agujeros con 1 cm de cemento entre ellas y una capa de cemento exterior de 1 cm de espesor. Los ladrillos son de formato métrico (Fig. 3).



Fig. 3.- Pared del problema propuesto.

En primer lugar, hallamos el coeficiente de convección α , para la pared interior de yeso, que es vertical, y el flujo de calor que la atraviesa es horizontal. Le corresponde un valor de $8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

El espesor de yeso tiene una conductividad térmica de $0.3 \text{ W/m }^\circ\text{C}$, teniendo en cuenta que tiene 1 cm ($1/100 \text{ m}$), el coeficiente K es:

$$K_{\text{yeso}} = \frac{0.3}{0.01} = 30 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

El coeficiente K del ladrillo de tres agujeros, nos viene dado directamente, y es $9.1 \text{ W/}^\circ\text{C}$.

La cámara de aire es vertical y tiene un coeficiente K de $4.5 \text{ W/}^\circ\text{C}$.

Los dos ladrillos de seis agujeros tienen un coeficiente K cada uno de ellos de $2.1 \text{ W/}^\circ\text{C}$. La capa de cemento entre ellos tiene un coeficiente K igual a la conductividad térmica del cemento ($1.40 \text{ W/m }^\circ\text{C}$) dividida por el espesor:

$$K_{\text{cemento entre ladrillos}} = \frac{1.4}{0.01} = 140 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

Y este mismo valor lo tendrá la capa exterior de la pared. Finalmente, se considera el coeficiente de convección α , de la parte exterior, que supondremos para un viento de $12 \text{ Km/h} = 23 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

El inverso del coeficiente K global, será la suma de los inversos de todos ellos:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{8} + \frac{1}{30} + \frac{1}{9.1} + \frac{1}{4.5} + \frac{1}{2 \times 2.1} + \frac{1}{2 \times 140} + \frac{1}{23} = 0.776$$

de donde $K = \frac{1}{0.776} = 1.29 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Ello quiere decir que cada m^2 de esta pared que soporte una diferencia de 1°C entre el interior y el exterior, será atravesado por una energía de 1,29 J cada segundo ($1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$).

Como se observa, resulta ya muy fácil obtener todas las pérdidas de calor de una vivienda, a base de ir sumando los distintos coeficientes K multiplicados por cada superficie.

Ejemplo:

Supongamos una vivienda integrada en un edificio, de forma que sus cuatro paredes sean exteriores. Las pérdidas a través de suelos y techo se consideran despreciables debido a que los vecinos superior e inferior mantienen similares temperaturas a la de la vivienda en cuestión. Se consideran 100 m^2 de pared como la del ejemplo anterior y 15 m^2 de vidrio de 4 mm de espesor, correspondientes a las ventanas (Fig. 4).

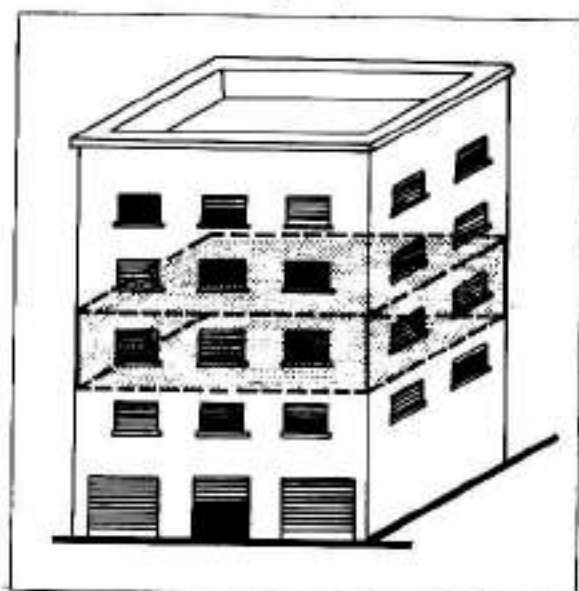


Fig. 4.- Paso sin pérdidas de calor por techos o suelo, debido a la presencia de vecinos

Debemos obtener la potencia de calefacción en enero (Temperatura exterior = $9,4^\circ \text{C}$).

La resolución de este sencillo problema se realiza mediante la aplicación de la fórmula de los grados-día:

$$L = U \times S \times GD$$

La superficie es conocida (100 m² de pared y 15 m² de cristal). El coeficiente K de la pared vale 1,29 y el del vidrio se puede calcular fácilmente como la suma de inversos de la conductividad del vidrio y de los coeficientes de convección interior y exterior (que son los mismos del ejemplo anterior).

La conductividad del vidrio vale: $K = \frac{0.95 \text{ W/m } ^\circ\text{C}}{0.004 \text{ m}} = 237.5 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$

por lo que:

$$\frac{1}{K_{\text{vidrio}}} = \frac{1}{8} + \frac{1}{237.5} + \frac{1}{23} = 0.1727$$

con lo que la $K_{\text{vidrio}} = \frac{1}{0.1727} = 5.79 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$

Como se observa, el vidrio tiene unas pérdidas de calor mucho mayores que la pared.

El coeficiente global de transmisión de calor será la suma del de la pared más el del vidrio, y multiplicando cada uno de ellos por su respectiva superficie:

$$US = 100 \text{ m}^2 \times 1.29 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C} + 15 \text{ m}^2 \times 5.79 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C} = 215.85 \text{ W}^\circ\text{C}$$

Como los grado-día en enero son 5,6, las necesidades de calefacción son:

$$L = 215.85 \text{ W}^\circ\text{C} \times 5.6^\circ\text{C} = 1.209 \text{ W}$$

Este edificio, que suponemos habitado, con un calefactor que proporcionase 1209 W durante las 24 horas del día se podría mantener a una temperatura de unos 20^o C.

INFILTRACIONES DE AIRE

Hemos visto que un cristal pierde mucha más energía que una pared. No obstante, en el caso de cristales deberemos considerar las entradas de **energía solar**, que son muy importantes.

Así, en el ejemplo anterior hemos supuesto que a los 15 m² de cristales no les llegaba el sol. Si el sol da en los cristales, la aportación de energía es importante y deberemos tenerla en cuenta (Fig. 5).

La cantidad de energía que puede pasar a través del

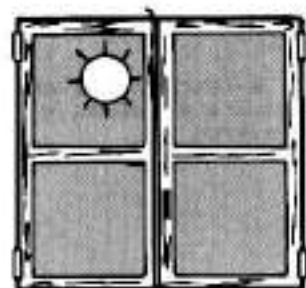


Fig. 5.- Paso de energía solar a través de las ventanas.

crystal de una ventana ya sabemos calcularla; siendo la ventana vertical, su cálculo se limita a multiplicar el valor de la irradiación por el **coseno del ángulo de incidencia** y multiplicar nuevamente el resultado por la **transmitancia** del cristal para ese ángulo. Todo esto lo hemos hecho en las lecciones 4 y 5, por lo que ponemos obtener el valor de la potencia que atraviesa el cristal por m^2 :

$$W = I \times \cos A \times \tau$$

W = Potencia que ha atravesado el cristal W/m^2 .
 I = irradiación W/m^2 .
 A = Angulo de incidencia.
 τ = Transmitancia del vidrio para el ángulo A .

Esta es la potencia que **atraviesa** el cristal de la ventana, pero no toda ella se absorbe, puesto que las habitaciones no son de color negro.

El factor que más influye es el **color del pavimento**, seguido del de las paredes (o muebles) y, finalmente, el techo (Fig. 6).

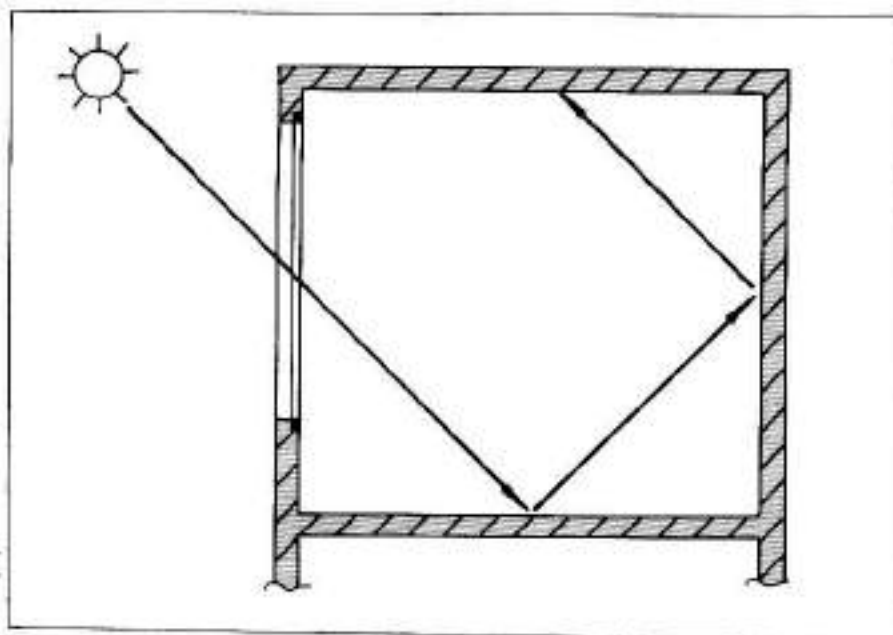


Fig. 6.- Absorción de la radiación solar en el pavimento, paredes y techos.

Si en el anterior ejemplo hubieran entrado por la ventana 10 Kw/h (1 Kwh = 3.6 MJ) durante las horas de sol, ello habría supuesto que las necesidades de calefacción hubiesen sido menores, pues habría que descontar las 10 Kwh entrados, que multiplicados por la absorbancia del interior (por ejemplo 0.5) daría 5 Kw/h durante todo el día.

En este caso, la energía total gastada durante las 24 horas del día es igual a los $1209 \text{ W} \times 24 \text{ h} = 29,02 \text{ Kwh} - 5 \text{ Kwh} = 24,02 \text{ Kwh}$, lo que, al dividirlo entre 24 horas, daría una potencia de 1 Kw, que es lo que deberá proporcionar el sistema de calefacción.

Es decir: en los días soleados se precisarían (caso de utilizar calefacción eléctrica) 24,02 Kwh, que serían medidos en el contador eléctrico y en días nublados, sin aportación solar, se gastarían 5 Kwh más.

Hay otro factor que afecta al valor de la calefacción: las **infiltraciones de aire** a través de puertas, ventanas, etc, (Fig. 7).

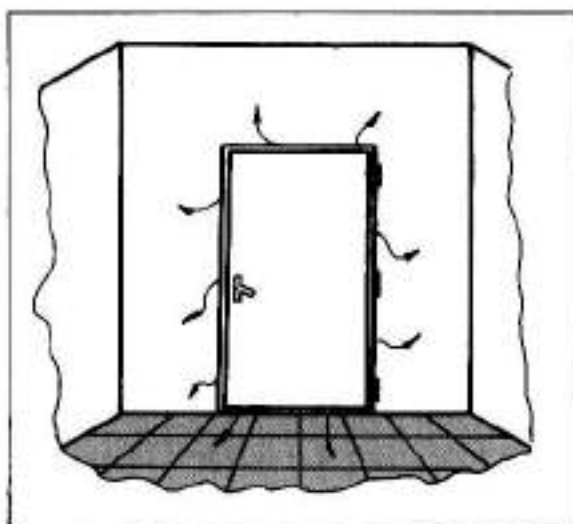


Fig. 7.- Infiltraciones de aire.

Estas infiltraciones van renovando el aire del edificio, incluso con todas las puertas y ventanas cerradas. La renovación del aire es necesaria, ya que aporta nuevo oxígeno imprescindible para la respiración de las personas y además se lleva consigo los olores producidos en el propio edificio. En cocinas y cuartos de aseo, la renovación del aire reviste aún mayor importancia.

Pero la renovación del aire supone la entrada de aire frío del exterior, que deberá ser calentado, lo que obligará a un consumo adicional de energía, bien sea solar o convencional.

Las infiltraciones de aire se miden por el **número de renovaciones por hora** que se efectúan. Una renovación por hora implica la entrada de un volumen de aire idéntico al de la habitación (con la consiguiente salida del mismo

volumen).

Los valores orientativos de las renovaciones por hora son:

Viviendas antiguas	2
Viviendas modernas	1
Viviendas bien selladas	0.5

La energía necesaria para calentar este aire depende de la humedad relativa del mismo y de la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior. De hecho, se considera una humedad relativa del 60%, que es la más corriente, con lo que la potencia adicional debida a la infiltración de aire vale:

$$E = 1300 \times V \times N \times (T^{\circ} \text{ int} - T^{\circ} \text{ ext})$$

E = Energía en J/h.

V = Volumen en m³.

N = Número de renovaciones p/h.

T[°]int = Temperatura int (°C).

T[°]ext = Temperatura ext (°C).

Así, si en el ejemplo anterior la vivienda posee un volumen de 300 m³, la energía adicional necesaria por las renovaciones (considerando un factor de renovación de 1), será de:

$$E = 1300 \times 300 \times 1 \times (20^{\circ} - 9,4^{\circ}) = 2,18 \text{ E}6 \text{ J/h}$$

en 24 horas, esto representaría $2,18 \text{ E}6 \times 24 = 5,24 \text{ E}7 \text{ J}$
 $= 14,56 \text{ Kwh}$

Este valor debería sumarse al ya obtenido de 29,02 Kwh (caso más desfavorable) para dar el valor de 43,58 Kwh, que se precisarían cada día para mantener la temperatura en el interior a unos 20° C.

Si se aporta menos energía, la temperatura interior disminuye, con lo que las pérdidas de calor del edificio también disminuyen.

CALCULO DEL CONSUMO DE CALEFACCION DE UN EDIFICIO

En los apartados anteriores de esta lección hemos visto

diversos métodos que nos han ido conduciendo, cada vez con mayor precisión, a poder calcular el consumo de calefacción necesario en un edificio.

Generalmente, y dependiendo de la zona donde se esté situado, la temporada de calefacción corresponde a 5 meses (en algunas zonas más, en otras menos), comprendidos entre noviembre y marzo, ambos inclusive.

Hemos visto que para calcular el consumo previsible de calefacción en un edificio necesitábamos saber el producto de la superficie (expuesta al exterior) por las pérdidas de calor. Este producto era de fácil obtención en edificios ya construidos, en los que llevaba tiempo funcionando la calefacción.

Mediante los coeficientes K hemos aprendido a calcular este coeficiente de pérdidas de calor para cualquier superficie usual en construcción, por lo que la aplicación del método de los grados-día no presenta ningún problema.

Hemos visto también el efecto que tienen las ventanas y ya sabemos, por anteriores lecciones, el proceso de cálculo de la energía solar que atraviesa una superficie.

Finalmente, hemos aprendido a tener en cuenta el efecto de las infiltraciones de aire que motivan la renovación de éste.

Todos estos factores, convenientemente sumados, nos darán el consumo previsible de calefacción para un edificio.

DATOS DE INTERES

A) COEFICIENTES DE TRANSMISION DE CALOR DE ALGUNOS MATERIALES DE CONSTRUCCION ($W/m^{\circ}C$)

Vidrio de acristalar	0.95
Maderas frondosas	0.21
Madera de coníferas	0.14
Contrachapado	0.14
Tablero de aglomerado	0.08
Moqueta	0.05
Asfalto	0.7
Rocas compactas	3.5



Rocas porosas	2.3
Arena con humedad natural	1.4
Suelo coherente con humedad natural	2.1
Arena seca	0.6
Grava seca	0.8
Cascote de ladrillo seco	0.4
Mortero de cal	0.87
Mortero de cemento	1.40
Enlucido de yeso	0.30
Hormigón armado	1.63
Hormigón	1.16

(Recuérdese que para obtener el coeficiente K, se debe dividir éste valor por el espesor del material).

B) COEFICIENTES K DE ALGUNOS MATERIALES DE CONSTRUCCION DE ESPESOR FIJO ($W/^{\circ}C$)

Ladrillo de 3 agujeros (vertical)	2.1
Ladrillo de 6 agujeros (2 x 3)	2.1
Ladrillo de 6 agujeros (3 x 2)	1.7
Ladrillo perforado (ceros) (lado menor)	2.05
Ladrillo perforado (lado mayor)	1.35
Ladrillo macizo (lado menor)	1.15
Ladrillo macizo (lado mayor)	1.20
Bovedilla cerámica	1.20
Bovedilla de hormigón	0.95

C) VALORES DEL COEFICIENTE K DE CAMARAS DE AIRE ($W/^{\circ}C$)

Horizontal	(20 - 100 mm)	0.19
Inclinada 45°	"	0.21
Vertical	"	0.23

D) VALORES DEL COEFICIENTE DE CONVECCION α EN PAREDES ($W/m^2/^{\circ}C$)

Aire en calma	(horizontal)	9.6
Aire en calma	(inclinada 45°)	9
Aire en calma	(vertical)	9
Viento 12 Km/h		23
Viento 24 Km/h		34

E) PODER CALORIFICO DE DIVERSOS COMBUSTIBLES

Gas natural:	41 MJ/m ³ .
Gas ciudad:	18 "
Hidrógeno:	11 "
Butano comercial:	47 MJ/Kg.
Propano:	45 "
Antracita:	38 "
Hulla:	34 "
Lignito:	25 "
Madera seca:	13 "
Serrín:	9 "
Coque:	30 "
Gasóleo C:	45 "
Fuel ligero:	44 "
Electricidad:	3.6 MJ/Kwh.

F) TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES (°C/)

TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES EN GRADOS CENTIGRADOS
(Fuente de información: Servicio Meteorológico Nacional)

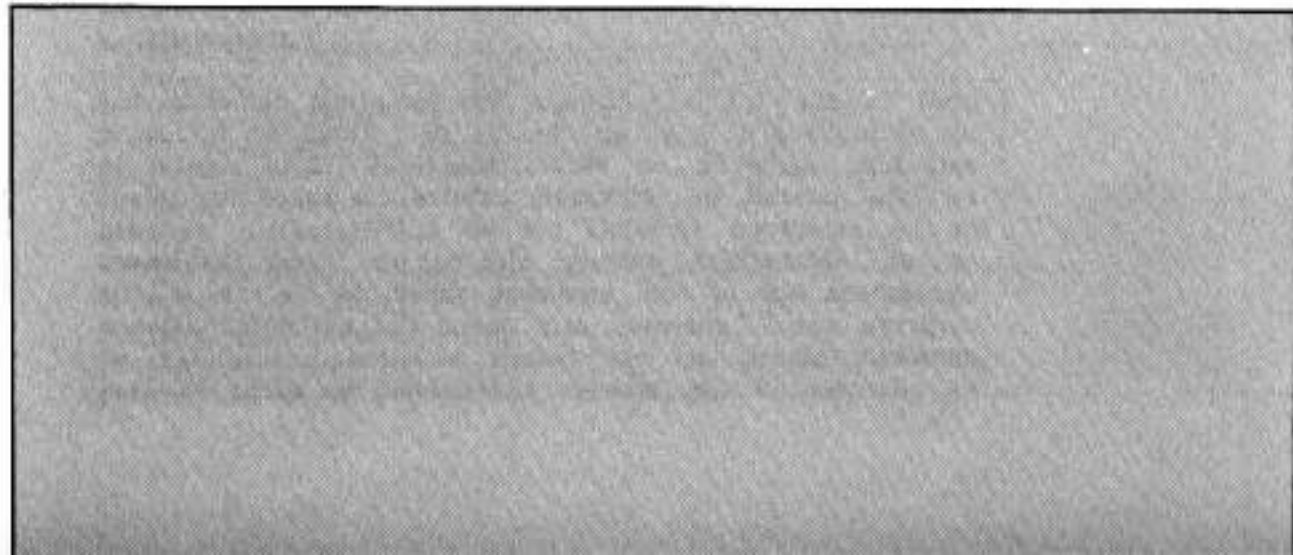
Provincia	Medias mensuales											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem.	Octubre	Noviem.	Diciem.
Alava	4,6	5,4	8,6	10,4	13,0	16,6	18,8	19,4	18,5	12,7	8,3	5,4
Albacete	4,2	5,6	9,0	11,0	15,3	21,6	24,1	23,8	17,8	13,7	8,7	5,2
Alicante	11,0	11,8	14,0	15,9	19,0	22,8	25,5	26,1	23,7	19,3	15,2	12,0
Almería	11,7	11,8	14,1	16,1	18,4	22,0	24,7	25,3	23,4	19,4	15,5	12,8
Avila	2,4	3,3	6,3	8,7	12,2	16,4	20,0	19,6	16,3	10,6	6,0	3,2
Badajoz	9,6	9,9	12,7	15,2	16,0	22,6	25,6	25,5	22,6	17,6	12,6	9,1
Baleares	10,5	10,5	12,2	14,5	17,4	21,4	24,1	24,5	22,6	18,4	14,3	11,6
Barcelona	9,4	9,9	12,3	14,6	17,7	21,6	24,4	24,2	21,7	17,5	13,3	10,2
Burgos	2,5	4,6	7,1	9,2	12,2	16,2	19,0	18,8	16,2	11,3	6,5	3,4
Cáceres	7,7	9,1	11,7	14,4	17,4	22,5	26,0	25,6	22,3	16,9	11,7	8,1
Cádiz	11,4	12,5	14,6	16,6	18,9	22,2	24,5	24,9	23,4	19,5	15,6	12,5
Castellón	10,4	11,1	13,1	14,9	17,8	21,6	24,3	24,7	22,6	18,6	14,3	11,1
Ciudad Real	5,4	7,3	10,4	12,9	16,3	21,2	25,5	24,8	21,8	14,6	8,9	6,2
Córdoba	9,1	10,7	13,5	16,3	19,4	24,4	27,9	27,6	24,3	18,6	13,6	9,6
Coruña	9,9	9,8	11,5	12,4	14,0	16,5	18,2	18,9	17,8	15,3	12,4	10,2
Cuenca	3,1	4,2	7,3	10,0	13,3	16,1	21,9	21,4	18,0	12,0	7,2	4,1



Provincia	Medias mensuales											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem.	Octubre	Noviem.	Diciem.
Gerona	7,1	8,4	11,1	13,4	16,8	20,7	23,5	23,3	20,9	16,0	11,3	8,0
Granada	7,0	8,4	11,0	13,3	16,3	21,8	25,7	25,3	21,8	16,0	11,6	7,7
Guzdalajara	3,5	5,9	9,5	11,9	15,5	20,2	24,3	23,5	19,8	13,7	8,4	5,5
Guipúzcoa	7,8	7,7	10,7	11,8	10,5	16,8	15,1	19,0	18,1	14,7	10,7	8,0
Huelva	11,1	12,3	14,4	18,4	18,9	22,4	25,0	25,2	23,3	19,4	15,2	11,9
Huesca	4,8	6,1	10,2	12,5	15,9	19,9	22,8	22,5	19,3	14,0	8,9	5,4
Jaén	8,2	9,6	12,3	14,1	16,3	23,8	27,7	27,3	23,4	17,6	12,7	8,9
León	2,8	4,2	7,6	9,9	12,5	17,2	19,7	19,5	16,6	11,8	7,0	3,6
Lérida	4,9	9,5	11,3	11,9	16,1	19,6	24,1	24,4	21,9	14,9	8,3	7,3
Logroño	5,1	6,5	9,7	11,9	14,9	19,1	21,6	21,5	19,0	13,8	8,9	6,1
Lugo	6,0	6,9	9,4	11,0	13,1	16,3	18,1	16,6	16,6	13,2	8,8	6,2
Madrid	4,9	6,5	10,0	13,0	15,7	20,6	24,2	23,6	19,6	14,0	8,9	5,6
Málaga	12,5	12,9	15,0	16,3	19,3	22,8	25,2	25,6	23,5	19,7	15,8	13,3
Murcia	10,7	11,8	14,2	16,0	19,5	23,4	26,0	26,3	23,8	18,9	14,4	11,6
Navarra	4,6	5,4	9,0	11,1	14,4	17,8	20,2	19,7	16,3	13,4	8,2	5,5
Orense	6,6	7,2	10,7	12,6	16,1	19,1	21,6	21,2	18,7	13,9	9,5	7,3
Oviedo	9,3	9,4	11,3	12,3	14,1	17,0	19,6	19,5	16,1	15,1	12,0	10,1
Palencia	3,3	4,6	8,2	10,5	13,5	16,1	21,0	20,6	17,6	12,2	7,2	3,9
Las Palmas	18,3	19,6	19,1	19,3	20,3	21,4	23,8	23,8	25,9	23,3	22,1	19,9
Pontevedra	9,2	10,1	12,3	14,2	15,6	18,1	20,2	20,5	18,2	14,9	11,9	9,5
Salamanca	3,7	4,9	8,1	10,5	13,7	16,4	21,5	21,2	18,1	11,9	7,4	4,2
S.C. Tenerife	17,4	17,5	18,2	19,2	20,4	22,4	24,2	24,7	24,1	22,7	20,5	18,4
Santander	9,3	9,2	11,5	12,3	14,2	16,9	18,8	19,3	18,2	15,3	12,2	9,9
Segovia	2,4	4,0	7,6	10,1	13,2	18,2	21,7	21,3	17,5	11,8	6,6	3,1
Sevilla	10,5	12,3	14,6	17,2	19,9	24,6	27,9	27,6	24,6	19,6	15,0	11,4
Soria	2,3	3,5	6,6	8,9	11,9	16,5	19,6	19,5	16,4	10,9	6,2	3,1
Tarragona	6,9	10,1	11,6	13,7	16,6	20,3	22,9	23,2	21,1	17,7	13,2	10,3
Teruel	1,6	3,5	6,7	9,1	12,9	17,2	19,2	16,9	16,7	11,1	6,6	3,3
Toledo	5,9	7,4	10,6	13,4	16,9	22,1	26,1	25,3	21,2	15,2	9,9	6,4
Valencia	10,3	11,0	13,1	14,8	17,8	21,9	23,9	24,5	22,4	18,3	14,4	11,1
Valladolid	3,3	5,1	8,6	11,0	14,1	18,5	21,3	20,4	17,8	12,9	7,7	4,4
Vizcaya	7,5	11,4	10,8	11,5	13,7	16,2	18,4	19,3	18,3	15,8	11,9	12,2
Zamora	3,6	5,3	8,6	11,2	14,2	18,6	21,6	21,2	18,0	12,6	7,5	4,3
Zaragoza	6,1	7,6	11,3	13,7	17,0	21,2	23,1	23,7	20,6	15,4	10,2	6,7



LECCION 21





21. DESCRIPCION DE UNA INSTALACION DE CALEFACCION POR ENERGIA SOLAR

INTRODUCCION

Examinados ya los consumos de calefacción precisos en un edificio, veremos ahora en esta lección cómo se estructura una instalación de calefacción, primero de forma general y luego particularizando para el caso de calefacción por energía solar.

DESCRIPCION DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE CALEFACCION

Existen numerosos sistemas de calefacción que pueden cumplir con mayor o menor eficacia su cometido, desde sencillos radiadores eléctricos hasta complejas instalaciones de convectores regulados electrónicamente. En general, los sistemas de calefacción pueden clasificarse en **puntuales** y **distribuidos**.

Los **sistemas puntuales** son aquellos en los que el foco productor de calor y la emisión de éste se encuentran en el mismo lugar. Ejemplos claros de sistemas puntuales suelen ser todas las estufas eléctricas, de butano, etc. La principal característica de los sistemas puntuales es su **movilidad**, pues comúnmente pueden trasladarse de un sitio a otro sin el menor problema, con lo que aportan su energía calorífica allí donde más conviene. Estos sistemas de calefacción puntuales suelen ser de **precio reducido** pero de **coste de combustible elevado**, por lo que sólo se

emplean en locales pequeños (Fig. 1).

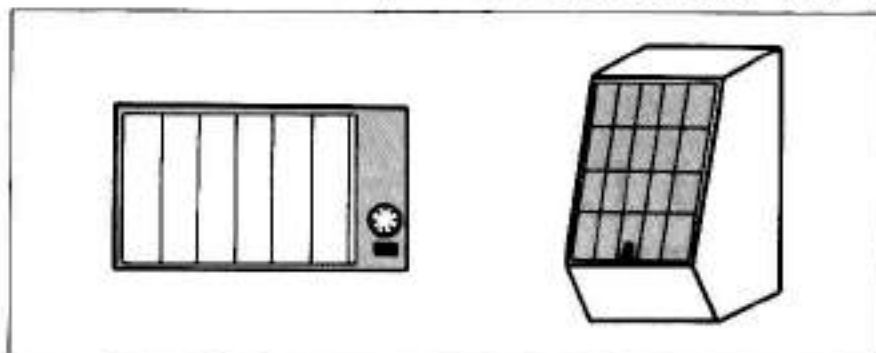


Fig. 1.- Ejemplos de sistemas de calefacción puntuales.

Los sistemas de calefacción **distribuidos** constan de un foco de calor situado en un cierto lugar, y de los emisores de calor situados en otros distintos. Un ejemplo claro de sistema de calefacción distribuido es una calefacción central, con una caldera y un conjunto de convectores repartidos por las distintas habitaciones. Estos sistemas de calefacción son **fixos**, no pueden trasladarse fácilmente de un sitio a otro y tienen **costes de instalación elevados**, pero el **coste de combustible es reducido** (Fig. 2).

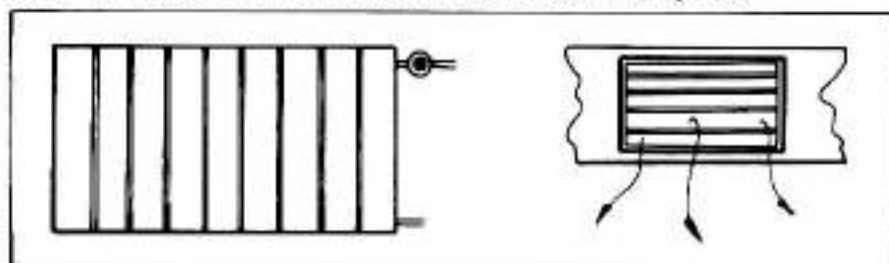


Fig. 2.- Ejemplos de sistemas de calefacción distribuidos (convector y aire caliente).

Los sistemas de calefacción distribuidos pueden ser **monotubulares** o **bitubulares** (especialmente en sistemas de líquidos).

En los sistemas **monotubulares**, un único tubo sale del foco productor de calor (caldera) y recorre todos los elementos calefactores, uno detrás de otro, hasta regresar a la caldera (Fig. 3).

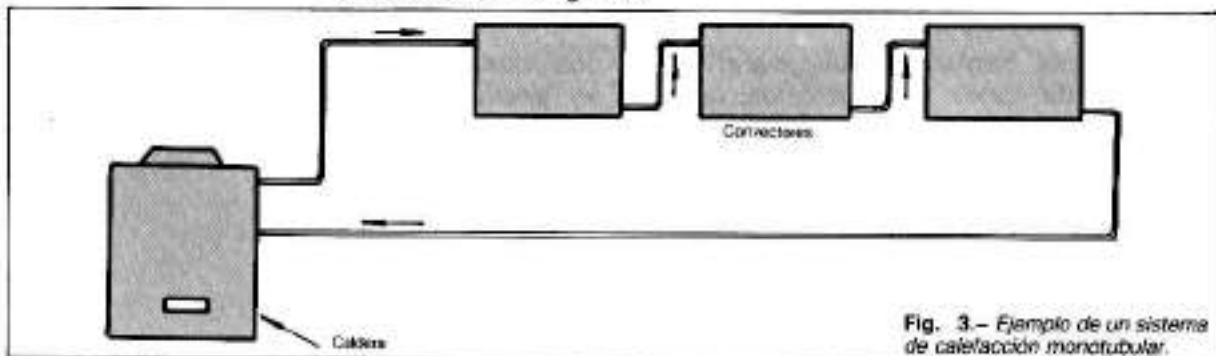


Fig. 3.- Ejemplo de un sistema de calefacción monotubular.

En los sistemas **bitubulares**, cada elemento calefactor recibe un tubo de entrada de líquido caliente y tiene una salida por donde sale este mismo líquido ya frío. Existe un **ramal caliente** del que se abastecen todos los tubos de entrada a los elementos calefactores y un **ramal frío**, por donde llegan a la caldera todos los retornos (Fig. 4).

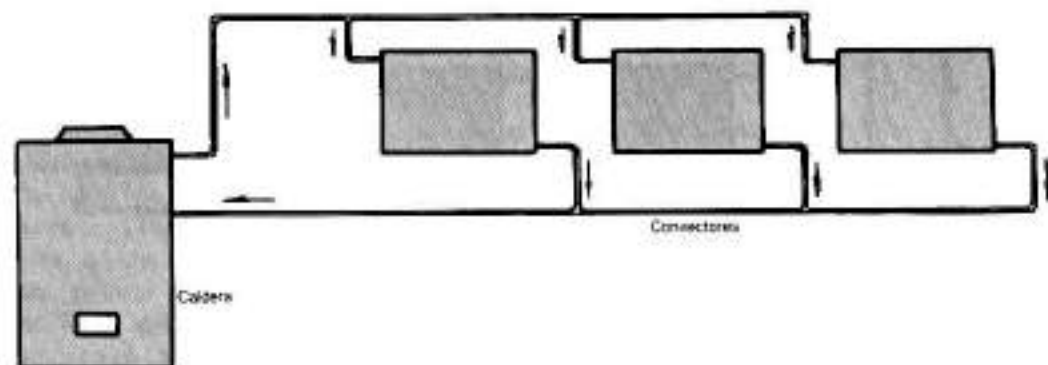


Fig. 4.- Ejemplo de un sistema de calefacción bitubular.

El sistema **monotubular** es más barato porque emplea menor cantidad de tuberías, llaves de paso, derivaciones, etc. que el sistema bitubular. En contra, en el sistema monotubular, el primer calefactor recibirá el líquido muy caliente, el siguiente más frío y así hasta el último, que será el que reciba el líquido más frío.

Este hecho se puede subsanar dando distintas superficies a los elementos calefactores, pequeñas las primeras y grandes las últimas, a fin de que el calor disipado por cada uno de ellos sea idéntico al de cualquiera de los demás. En este sistema no puede cerrarse un calefactor a no ser que se emplee una llave de paso especial de tres vías, puesto que significaría impedir el paso del líquido a la totalidad de elementos calefactores.

El sistema **bitubular** permite que todos los elementos calefactores reciban el líquido caliente a la misma temperatura, por lo que su superficie estará de acuerdo con las necesidades de la habitación a calentar. Este sistema permite dejar diversos calefactores fuera de servicio, sin más requisito que impedirles la entrada de líquido caliente.

Los sistemas monotubulares suelen emplearse en pequeñas zonas, siendo frecuente que la distribución sea bitubular (por ejemplo, por plantas de un edificio) y que cada planta, en cambio, tenga una distribución monotubular.

También se usan a veces sistemas monotubulares en edificios públicos con grandes salas donde no importe excesivamente una perfecta regulación de la temperatura (Fig. 5).

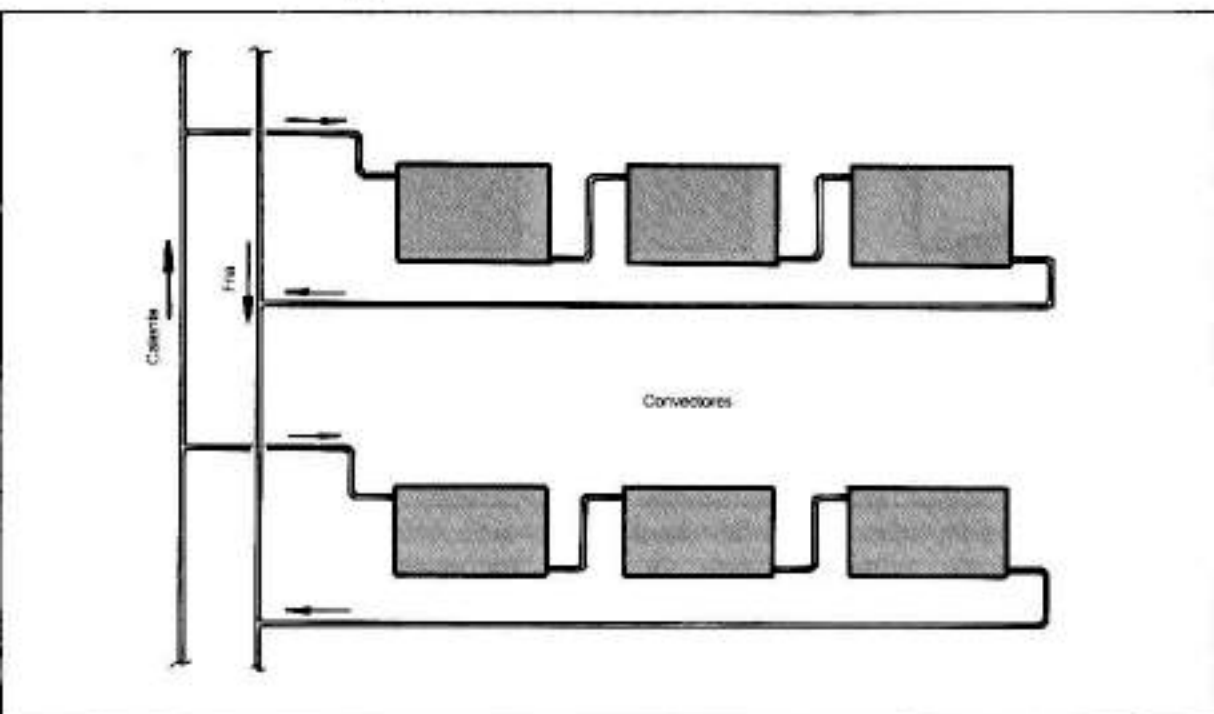


Fig. 5.- Ejemplo de un sistema de calefacción mixto (distribución general bitubular y localización unitubular).

Fuera de estos casos, lo normal es hacer una distribución bitubular, pues permite un mayor control de la temperatura ambiente interior.

Dado el elevado nivel de precio de los combustibles, se observa que estos sistemas de calefacción son los más adecuados a los momentos actuales.

Así, pues, en lo sucesivo, trataremos de sistemas de calefacción distribuidos, ya que éstos son los únicos aplicables a la energía solar.

Veamos cuáles son los diferentes sistemas de calefacción en los que puede usarse la energía solar de forma satisfactoria:

- Suelo radiante.
- Conveectores.
- Aire caliente con "fan - coils" (colectores de líquido).
- Aire caliente con almacenamiento en grava (colectores de aire).

CALEFACCION POR SUELO RADIANTE

El suelo radiante es el sistema de calefacción más interesante desde el punto de vista de la energía solar. Su principal ventaja reside en que la temperatura del líquido portador de calor en los paneles es muy baja (unos 40° C), con lo cual los paneles solares funcionan con un rendimiento muy alto. Además, en invierno el valor de la irradiación suele ser menor que en verano, debido a la absorción de la radiación solar en la atmósfera. Esto viene motivado por el hecho de que al estar el Sol más bajo sobre el horizonte, los rayos solares tienen que atravesar un mayor espesor de atmósfera, con lo cual se producen más absorciones de la radiación solar. Por otra parte, al estar el ambiente frío, los colectores y tuberías tienen pérdidas de calor ligeramente mayores que en verano.

Respecto a otros sistemas de calefacción, el suelo radiante tiene la ventaja de que el foco emisor de calor es el propio pavimento (Fig. 6), es decir, la parte más baja de la habitación, con lo que, al calentarse, el aire circundante asciende, calentando a su vez todo el recinto y proporcionando una sensación muy agradable por el hecho de mantener los pies calientes y la cabeza fría.

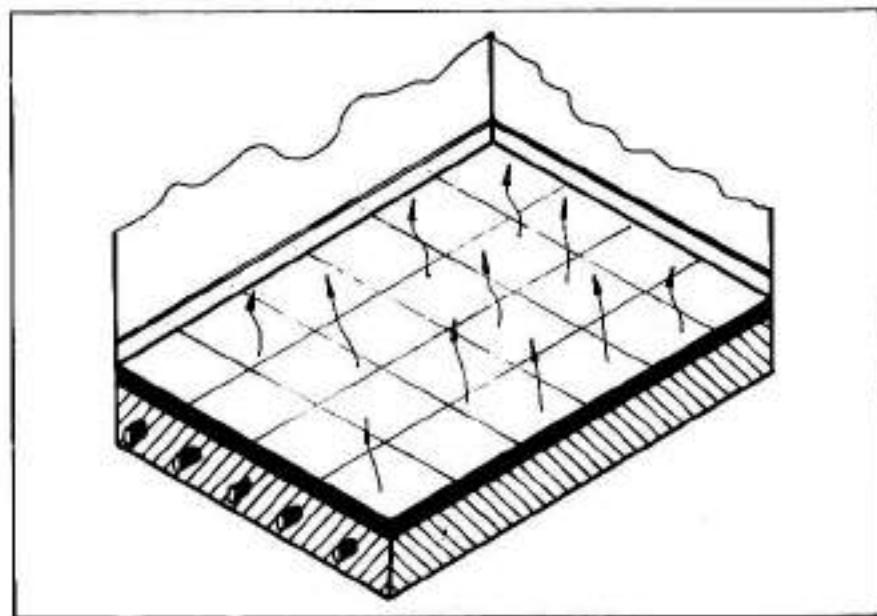


Fig. 6.- En la calefacción por suelo radiante, el propio suelo es el elemento calefactor.

El gran inconveniente del sistema es que debe instalarse en edificios de nueva construcción, ya que lo contrario exigiría tener que levantar todo el pavimento para instalar los tubos. Otro inconveniente es su **gran inercia térmica**, que hace que una vez puesto en marcha tarden cierto tiempo en sentirse sus efectos calefactores.

Aparte de esto, el sistema de suelo radiante realizado en edificios de nueva construcción es relativamente económico, pues su instalación sólo requiere un tendido de tubos, generalmente de cobre. También se están haciendo últimamente estos tubos de plásticos especiales, con plena garantía.

El precio de los tubos es relativamente barato, ya que el sistema no precisa de convectores, racords, elementos auxiliares de fontanería, etc.

La instalación de un suelo radiante exige disponer encima de las bovedillas de una capa de hormigón (esta capa de hormigón la lleva cualquier tipo de suelo). Encima de esta capa de hormigón se coloca otra de aislante térmico, al objeto de impedir que el calor se disipe hacia el techo del piso inferior (o hacia el terreno, si es una planta baja); seguidamente, suele colocarse un impermeabilizante (aunque no es imprescindible), que por lo común es una lámina de plástico. Encima de ella se sitúa el haz de tubos, que recorren alternativamente todo el espacio de la habitación. Estos tubos tienen diámetros interiores comprendidos entre los 10 y 15 mm, y la separación entre tubo y tubo es de unos 10 - 15 cm. Para mayor seguridad, el haz de tubos no tiene ningún empalme, soldadura, etc. Encima del haz de tubos se coloca una capa de mortero de cemento que los recubre totalmente, y sobre esta capa se coloca el pavimento (Fig. 7).

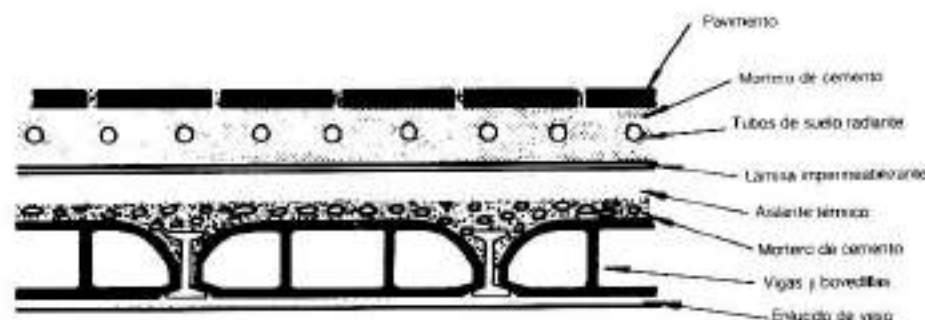


Fig. 7.- Corte de un suelo radiante.

El mejor tipo de pavimento es el **cerámico**, debido al menor espesor del mismo respecto al tarrazo convencional, lo que facilita una rápida transmisión del calor. Además, la superficie del pavimento cerámico es ligeramente rugosa, en contraste con el pulido del pavimento de tarrazo. Esta mayor rugosidad favorece la transmisión de calor por convección. No obstante lo anterior, también puede instalarse suelo radiante en pavimentos de tarrazo.

La regulación de la calefacción se realiza en cada habitación mediante una llave de paso situada en la pared. Debido a que esta llave de paso puede colocarse en cualquier lugar discreto, y a su reducido tamaño, la habitación queda completamente libre de los típicos elementos calefactores adosados a alguna de sus paredes.

CALEFACCION POR CONVECTORES

Los **convectores** (mal llamados radiadores) son los elementos calefactores clásicos de una instalación de calefacción distribuida (Fig. 8).

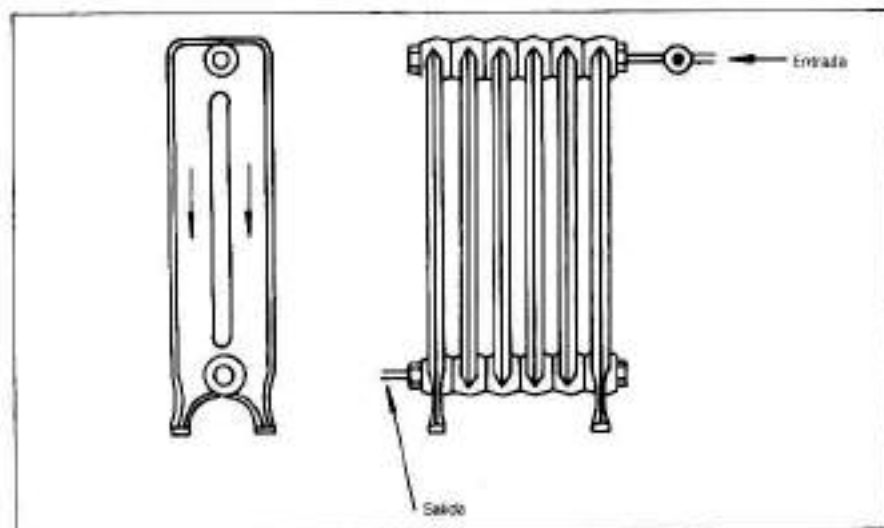


Fig. 8.- Convector de calefacción y corte del mismo.

Antiguamente los convectores estaban formados por unas grandes piezas de hierro colado, que se unían entre sí para dar la longitud deseada. Su diseño no era el más apropiado para una correcta evacuación del calor, por lo que necesitaban temperaturas de entrada del líquido muy elevadas.



Actualmente existen convectores de hierro colado más pequeños y con menores espesores de pared, gracias a los progresos de la técnica metalúrgica (una de las razones del elevado grosor de las piezas antiguas de calefacción eran las impurezas y porosidades del hierro empleado en ellos) y también al uso de otros materiales, como aluminio, dotados de formas adecuadas y de **aletas** para una mejor disipación del calor por convección.

Entre las ventajas de los nuevos convectores citaremos el hecho de que pueden funcionar a temperaturas más bajas, y por lo tanto más adecuadas al empleo de una energía auxiliar.

El montaje de los convectores es sencillo, no requiriendo un excesivo coste de mano de obra. Los tubos se pueden empotrar en las paredes o circular por el entretecho.

Muchas veces, los convectores se sitúan en lugares inadecuados, como puede ser debajo de una ventana. Esta colocación obedece al hecho de intentar aprovechar al máximo el espacio disponible para los muebles, sillones, etc., adosados a las paredes. Ya vimos en la lección anterior que un cristal tenía un coeficiente K mucho más elevado que una pared de obra. Así, pues, la colocación de convectores bajo ventanas es una forma de aprovechar de modo **ineficiente** la energía de calefacción.

En el caso de que la energía solar sea el aporte de calefacción, este hecho es más que grave, debido a que repercutirá en una mayor extensión del campo de colectores y en un mayor consumo de combustible auxiliar, con los consiguientes costes económicos.

El inconveniente del sistema de calefacción por convectores en calefacción solar reside, como ya sabemos, en las **elevadas temperaturas** que requieren los convectores, lo que hace que los paneles solares funcionen en un punto de poco rendimiento, o bien que tengan que ser paneles especiales mucho más caros. Este problema se puede compensar a base de convectores de **mayor superficie**, pero entonces se encarece la instalación y estos convectores tan grandes ocupan demasiado espacio en las habitaciones.

Los convectores tienen la ventaja de una rápida respuesta (**poca inercia térmica**) y de poderse regular e incluso anular, simplemente ajustando la llave de paso, por lo que en instalaciones de calefacción convencionales son el

sistema más usado.

CALEFACCION POR AIRE CALIENTE CON «FAN-COILS»

La calefacción también puede obtenerse por **aire caliente** mediante "fan-coils".

Los "fan-coils" son intercambiadores de calor líquido-aire, con una estructura similar a la de un radiador de automóvil: una serie de tubitos con aletas, por donde circula el líquido que debe enfriarse y un ventilador que impulsa aire frío a su través. Este aire frío, al pasar por las aletas, se calienta y produce como resultado un chorro de aire caliente (Fig. 9).

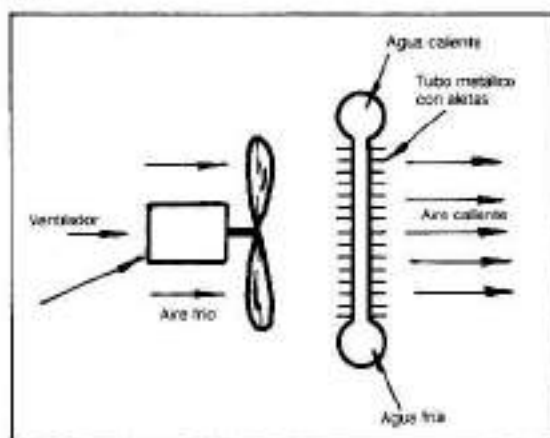


Fig. 9.- Corte esquemático de un fan-coil.

Una instalación convencional de este tipo consta en primer lugar de una caldera donde se calienta el líquido. Los "fan-coils" pueden ser varios o uno solo. Para instalaciones pequeñas se coloca uno solo, y mediante conductos se distribuye el aire caliente. En instalaciones grandes, el **elevado diámetro** de estos conductos de aire hace más aconsejable llevar mediante una tubería el líquido caliente a los diversos "fan-coils" ubicados en diversos puntos del edificio.

Las salidas de aire caliente deben hacerse lo **más bajas** posible para obtener el máximo rendimiento de este sistema. Sin embargo, es frecuente que debido al elevado diámetro de los conductos, éstos se instalen por el techo,

generalmente con sección cuadrada o rectangular, y la entrada de aire caliente se efectúe por el techo mediante unas rejillas deflectoras que se encargan de dirigir el chorro de aire caliente hacia abajo. Si el edificio tiene varias plantas que deben calefactarse por este sistema, el conducto que pasa por el techo de la planta inferior sirve para calentar a la planta superior, y así sucesivamente.

La ventaja de este sistema es que no precisa una temperatura demasiado elevada en los paneles solares (intermedia entre el suelo radiante y los convectores). La instalación suele ser económica y regulable sólo con poner en marcha el ventilador del "fan-coil" y/o regulando la entrada del líquido en el mismo.

También se puede controlar la salida del aire abriendo o cerrando las trampillas, pero esto no es excesivamente aconsejable debido a que haciendo eso variaremos el caudal de aire caliente en el resto de las habitaciones. Así, si ya tenemos una temperatura adecuada y cerramos la trampilla, el resto de la instalación puede sufrir un aporte de calefacción excesivo, y puede ocurrir el efecto contrario si abrimos muchas trampillas.



SAATCHI & SAATCHI / 88

Como se observa, este sistema no se presta a una fácil regulación individual, siendo apropiado para calentar grandes salas, naves industriales, etc.

Un pequeño inconveniente que tiene es el hecho de que los ventiladores introducen siempre un **pequeño ruido**, que si bien de día pasa desapercibido, de noche puede resultar molesto.

Este sistema presenta una **muy reducida inercia térmica**, pues desde el mismo momento de su puesta en marcha es ya apreciable una sensación de confort (más aparente que real).

En instalaciones de energía solar, este sistema es adecuado tanto por el rendimiento de los paneles como por su economía de instalación. Además, se presta fácilmente a la instalación del sistema auxiliar de calefacción, al igual que el suelo radiante o los convectores.

CALEFACCION POR AIRE CON ALMACENAMIENTO DE CALOR EN GRAVA

El sistema de calefacción por **aire caliente con almacenamiento en grava**, está pensado específicamente para usar energía solar, y presenta una serie de diferencias respecto al sistema de aire caliente con "fan-coils" que acabamos de ver.

En este sistema, la distribución interior es **exactamente** igual que la exterior: conductos de gran diámetro para el paso del aire con sus correspondientes trampillas y rejillas. Las diferencias están en la captación (Fig. 10).

Los paneles solares son de **aire** y por lo tanto más sencillos y económicos que los de líquido. Además, no hay que temer problemas de corrosión, heladas, vaho en el interior de los paneles, etc.

El sistema de la instalación es similar a un panel de líquido. La única diferencia estriba en el mayor diámetro de los conductos de aire.

Un ventilador toma aire de la parte inferior del acumula-

dor de grava (que se examinó en la lección 12) y lo introduce en el panel solar por su parte inferior. Este aire caliente sale por la parte superior y va hacia el acumulador de grava.

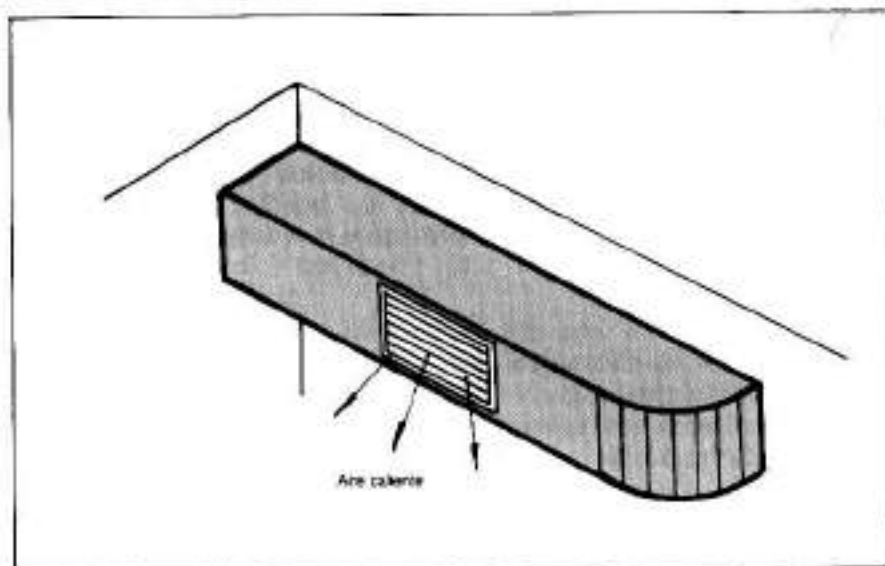


Fig. 10.- Distribución interior de aire caliente.

Los paneles solares de aire suelen proporcionar un rendimiento energético algo más bajo que uno similar de líquido (aproximadamente un 10% menos), pero la estratificación del aire caliente en el acumulador es mejor que en los sistemas de líquido, compensándose así el efecto del menor rendimiento del panel solar de aire.

Con un diseño adecuado del acumulador, y con la ayuda de pantallas deflectoras, se puede conseguir el almacenamiento y consumo simultáneo y provocar la mínima turbulencia en el interior del acumulador.

Este acumulador de grava presenta respecto a uno de líquido un **mayor volumen**, por lo que casi siempre está enterrado, hecho que no le afecta en absoluto. Por esta razón, a veces es preferible el sistema de aire caliente con "fan-coils", debido al menor volumen del acumulador.

Un segundo ventilador se encarga de transferir el aire caliente del acumulador al edificio.

En los casos de insuflar aire caliente a una habitación, debe tenerse muy presente que debemos **extraer** el mismo volumen de aire que entramos; de lo contrario, el aire no entrará. En general, en estas instalaciones deben colocarse unos **conductos de retorno** del aire caliente (viciado) de

las habitaciones.

Este aire caliente viciado se puede evacuar al exterior directamente, se puede mezclar con aire fresco o, en el mejor de los casos, puede intercambiar su calor con aire fresco, que es la solución más aconsejable, ya que así recuperamos el calor y renovamos a la vez el aire con la consiguiente aportación de oxígeno y la eliminación de olores.

Como se observa, en los casos de calefacción por aire caliente el tema de las **infiltraciones de aire** es importante, como consecuencia de que el interior del edificio está a una presión atmosférica **ligeramente superior** al exterior (por el incremento de presión provocado por el ventilador), lo que hace que si las puertas y ventanas cierran mal, las salidas de aire caliente hacia el exterior sean mucho más importantes que con otro sistema de calefacción.

La elección de uno de los cuatro sistemas es difícil y depende de múltiples factores a tener en cuenta, que van desde el precio de la instalación hasta el uso que va a hacerse del mismo.

Así, en un hospital o en un edificio de uso permanente que requiera calefacción las 24 horas del día, un sistema de suelo radiante sería ideal, mientras que en una iglesia, sala de conferencias, etc. sería preferible uno de aire caliente, el cual podría calentar rápidamente el local y extraer los olores, humo de tabaco, etc.

EQUIPOS DE CONTROL

En instalaciones que usen paneles solares de líquido, el funcionamiento de los equipos de control es similar al de los ya examinados al hablar del agua caliente sanitaria, con la única salvedad de que tal vez estos paneles estén **más inclinados** para un mejor aprovechamiento de la energía solar en invierno.

Las instalaciones de aire también llevan los sistemas de control regulado mediante un termostato diferencial, aunque son más sencillos pues no precisan purgadores, vasos de expansión, llaves de purga, etc.

Las instalaciones de suelo radiante y convectores son fáciles de controlar individualmente (en los sistemas

bitubulares) mediante **válvulas termostáticas**.

Estas **válvulas termostáticas** sustituyen a las típicas llaves de paso. En una válvula termostática se indica la temperatura ambiente deseada. Mientras la temperatura de la habitación sea inferior a la temperatura indicada, la válvula termostática dejará pasar libremente el líquido calefactor. Cuando la temperatura ambiente de la habitación sobrepase el valor prefijado con anterioridad, la válvula termostática se cerrará, impidiendo el paso del líquido.

En instalaciones de calefacción, a veces es necesario instalar una sonda de temperatura o un medidor de caudal en las proximidades de la bomba de circulación, que detendría la bomba en caso de que el retorno estuviera a una temperatura excesivamente elevada, o en caso de que se cerraran todos los elementos de calefacción.

La forma de conectar el sistema de energía auxiliar (que, recordemos, debe proporcionar el 100% del consumo de calefacción), debe hacerse con las debidas precauciones, ya expuestas en la lección 12, para evitar un excesivo consumo de energía auxiliar. Estas precauciones deben extremarse en el caso de usar un sistema de convectores que requiera temperaturas altas, ya que, por ejemplo, si los convectores necesitan 80° C para su correcto funcionamiento, es incorrecto plantear la instalación solar de forma que proporcione agua caliente a la temperatura de 60° C, para luego, mediante el sistema auxiliar, elevar esta temperatura a 80° C. En efecto, el agua entrará en los convectores de 80° C pero saldrá a una temperatura inferior, supongamos de 65° C. En estas circunstancias el sistema auxiliar aportará la totalidad de la energía de calefacción y además icalentará el agua del acumulador! Y todo esto puede ocurrir bajo un Sol espléndido. Por lo tanto, la puesta en marcha del equipo auxiliar debe limitarse al caso de que la temperatura del depósito acumulador sea insuficiente, siendo a veces preferible disponer de unas llaves de paso que, en caso de conectarse el sistema auxiliar, aislen el depósito acumulador.

Finalmente debemos decir que, durante el verano, en las instalaciones de calefacción la energía solar no utilizada puede resultar un problema. Generalmente, estas instalaciones suelen proporcionar también agua caliente sanitaria, con lo que puede compensarse, en parte, el exceso de energía que se produce en esa estación. Según la accesibilidad de los paneles, puede ser conveniente cubrir parte



de ellos con objetos opacos, dejando tan solo los necesarios para el suministro de agua caliente sanitaria, que deberán ser los paneles más próximos a las tuberías principales de salida del campo de colectores.



LECCION 22

El primer paso en el desarrollo de un programa de control de calidad es la identificación de los requisitos del cliente. Esto se hace a través de la investigación de mercado y la comunicación con el cliente. Los requisitos se documentan en un plan de control de calidad.

El segundo paso es establecer los estándares de calidad. Estos se basan en los requisitos del cliente y en las mejores prácticas de la industria. Los estándares se documentan en un manual de control de calidad.

El tercer paso es implementar el sistema de control de calidad. Esto implica la asignación de responsabilidades, la capacitación del personal y la implementación de procedimientos de control de calidad.

22. CALCULO DE UNA INSTALACION DE CALEFACCION POR ENERGIA SOLAR

INTRODUCCION

En esta lección procederemos al cálculo de una instalación de calefacción mediante el método "F-CHART", y observaremos que, al contrario de lo que ocurría con el agua caliente sanitaria, los valores de los parámetros f mensuales varían mucho de un mes a otro, lo que hace que la calefacción por energía solar no sea tan ventajosa como la instalación de agua caliente sanitaria.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Al igual que en el caso del agua caliente sanitaria, el cálculo de una instalación de calefacción supone la determinación de una cierta superficie de paneles solares. Dado que el problema es **indeterminado**, la concreción de la superficie óptima se realiza de acuerdo con **criterios económicos**. Todo esto ya ha sido estudiado en las lecciones 15 y 17.

Las instalaciones de calefacción presentan el problema de que sólo se utilizan durante unos meses al año, por lo que el cálculo de las mismas es más corto, ya que no se consideran aquellos meses en que no se precisa calefacción.

El cálculo se efectúa mediante el mismo formulario "F-CHART" que se utilizó para el agua caliente sanitaria si es un sistema de líquido (paneles de líquido), con la única variación de omitir las columnas 12 y 13.

Si los paneles son de aire, se utiliza otra hoja como primera parte del formulario, siendo la segunda común



para todos. Ello es debido a que la obtención del parámetro mensual f es distinta en sistemas de aire que en sistemas de líquido.

Durante los meses que no funciona la calefacción, se omitirán todos los valores, pues no son necesarios para el proceso.

El cálculo de una instalación de calefacción consta de tres partes bien diferenciadas:

- Estimación del consumo de calefacción.
- Obtención del parámetro F para diversas superficies.
- Determinación de la superficie óptima en función de criterios económicos.

La primera parte (estimación del consumo de calefacción) es independiente de si la instalación de calefacción será solar o no, y del sistema de calefacción empleado.

La segunda parte (obtención del parámetro F para diversas superficies) dependerá de si los paneles solares son de aire o de líquido, pero no del sistema de calefacción elegido.

La tercera parte (determinación de la superficie óptima) está en función del sistema de calefacción elegido, pues sus costes pueden tener diversos valores (si bien las diferencias entre los sistemas de calefacción no son excesivas).

La determinación del **consumo de calefacción** se realiza del modo expuesto en la lección 20, calculando por separado las pérdidas de calor a través del edificio, las de infiltración de aire y las aportaciones de calor a través de las ventanas, todas con los métodos dados en dicha lección (Fig. 1).

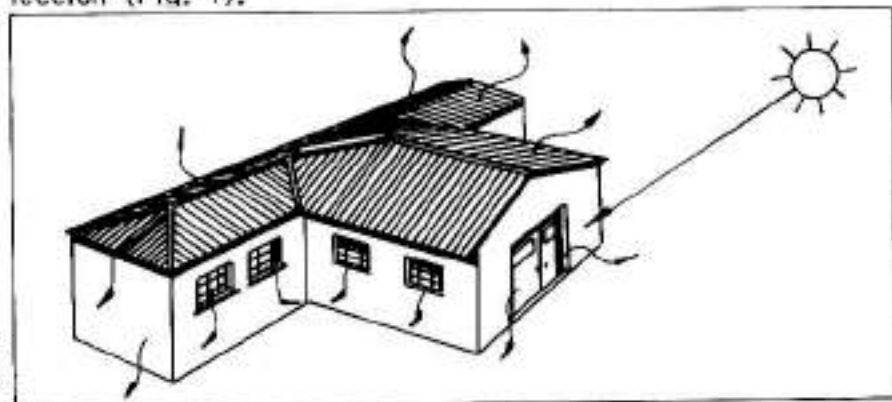


Fig. 1.—Pérdidas de calor a través de paredes, techos y suelo; infiltraciones de aire y aportación solar.

El cálculo de los parámetros mensuales f , en calefacción (casi nunca en agua caliente sanitaria), puede dar lugar a que los valores de los parámetros adimensionales X e Y sean superiores a 18 y 3, respectivamente. En tales condiciones, el cálculo de f no es válido. El hecho de que X o Y sean superiores al valor máximo puede deberse a dos hechos: o que la superficie elegida al azar es excesivamente grande, o que el consumo mensual es muy reducido.

Este último caso (consumo mensual muy reducido) es bastante frecuente en el primer y/o último mes de la temporada de calefacción en que la captación de energía solar es desproporcionadamente grande respecto al reducido consumo de calefacción. En estos casos, se considera que f es siempre igual a la unidad. Del mismo modo se procederá (haciendo $f = 1$) en los casos de que el parámetro f obtenido sea superior a 1. Recalcamos que estos casos no suelen darse en consumos uniformes a lo largo del año, y que el hecho de presentar los parámetros adimensionales X e Y o el f fuera del rango sólo debe afectar a los primeros y/o últimos meses de la temporada de calefacción, en los que los consumos son muy reducidos.

Si los valores de los parámetros adimensionales X y/o Y del primer o último mes de la temporada de calefacción están fuera de límites, para valores de superficie que dan parámetros f normales en el resto de meses de la temporada de calefacción, entonces es preferible suprimir ese mes de los cálculos y considerarlo como si no fuera de la temporada de calefacción.

La eficacia del sistema de calefacción (suelo radiante, convectores, aire caliente, etc.) se considera igual para todos ellos, pues sus principales diferencias estriban en la inercia térmica (velocidad en la que se calienta la habitación), pero no en el total de la energía aportada, ya que, estando bien diseñados los sistemas de calefacción, las habitaciones han de estar tras el período transitorio a la misma temperatura y habiendo consumido la misma energía.

METODO «F-CHART» PARA AIRE

El método "F-CHART" es aplicable también para instalaciones de energía solar que utilicen paneles solares de

aire y almacenamiento de calor en lechoso rocoso.

Si hemos de usar el método "F-CHART" para aire, deberemos emplear un **formulario diferente** para la primera parte (columnas 1 a 13). La segunda parte del formulario (columnas 14 a 23) es idéntica en ambos sistemas, a excepción de la columna 16, que para sistemas de aire no se utilizará.

Las diferencias de un sistema de aire respecto a uno de líquido son:

- 1º El valor del coeficiente F (factor de eficacia de intercambio de calor entre el fluido -aire en este caso- y la placa colectora) es **menor** en paneles de aire que en los de líquido. Esto hace que el rendimiento de un panel de aire sea menor que el de uno de líquido, así como que FU y $F(\tau\alpha)$ sean menores (Fig. 2).

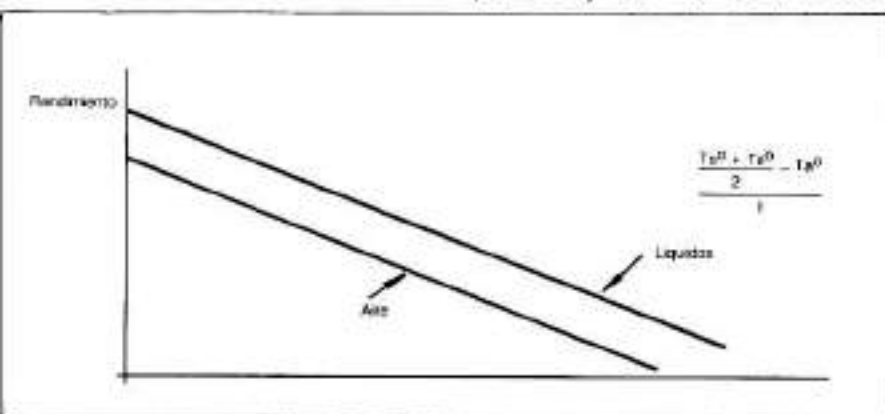


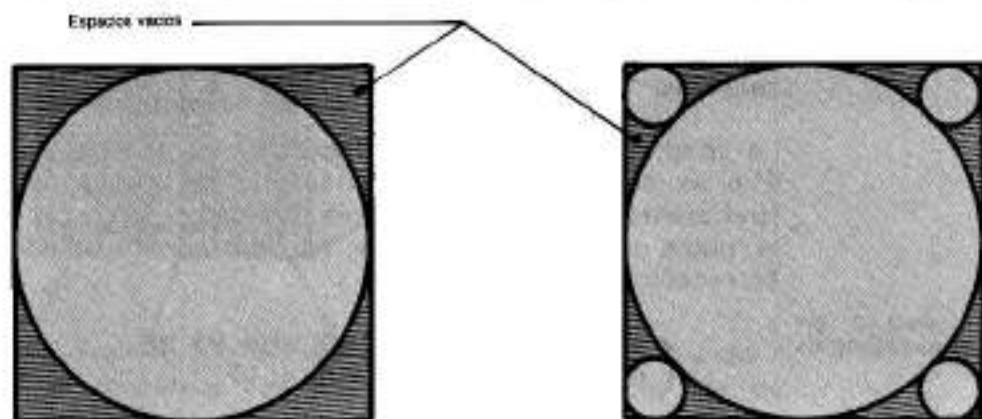
Fig. 2.- El rendimiento de un panel de aire es inferior a otro equivalente de líquido.

- 2º El caudal óptimo que ha de circular por un panel de aire, es de 10 l/s m², pudiendo oscilar entre 5 y 20 l/s m².
- 3º El volumen de almacenamiento óptimo es de 0,25 m³ de roca por m² de superficie, pudiendo oscilar este valor entre 0,125 y 1 m³/m².
- 4º El tamaño de las piedras ha de ser de 1 a 3 cm de diámetro. Son preferibles las piedras **redondeadas** y de **tamaño uniforme**.

La **uniformidad del tamaño** de las piedras se debe a que si son redondas (supóngase esféricas), el volumen ocupado por las piedras respecto al volumen total (factor de empaquetamiento) vale $\pi/6 = 0,52$ (las esferas ocupan el 52% del volumen total y el aire puede circular fácilmente entre ellas e intercambiar el calor. Si se utilizan piedras de diferente tamaño, las piedras pequeñas se colocarán en los intersticios

entre piedras grandes, haciendo que el factor de relleno sea superior a $\pi/6$ (que es la relación entre los volúmenes de una esfera y el cubo de que contiene a la esfera) (Fig. 3). Un factor de relleno superior altera la hipótesis en las que se basa el método "F-CHART", aumentando la capacidad de almacenamiento por unidad de volumen y la pérdida de carga que debe suministrar el ventilador.

Fig. 3.— El factor de empaquetamiento es mayor al poner esferas de diferentes tamaños.



- 5º La longitud del lecho rocoso debe ser de 1.25 a 2.5 m en la dirección del aire. El ancho del depósito queda, pues, determinado en función de su volumen (Fig. 4).

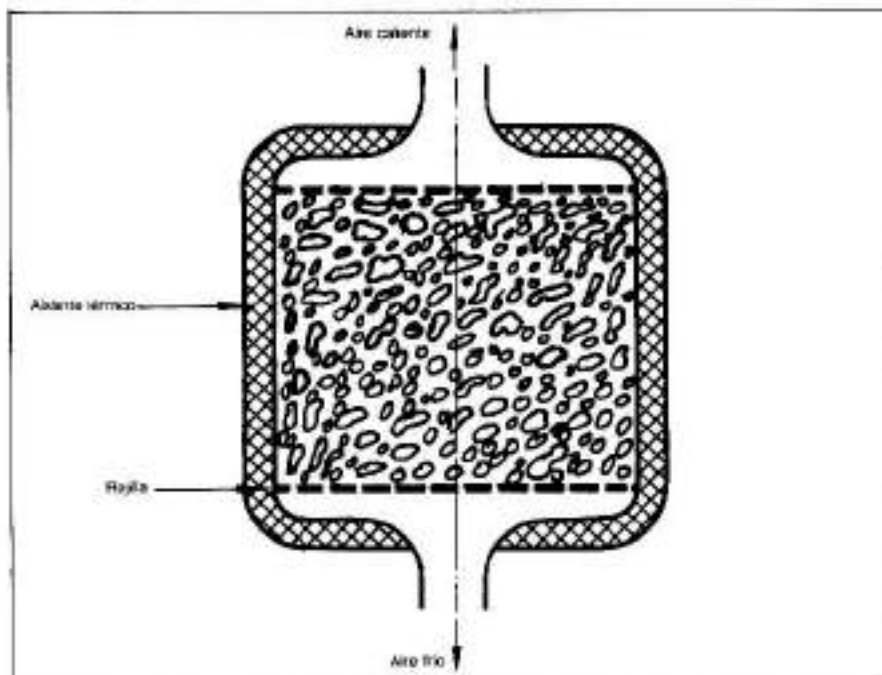


Fig. 4.— Depósito de almacenamiento de calor en lecho rocoso.

6º El valor de la fracción solar mensual f se calcula mediante otra expresión que es:

$$f = 1,04 Y - 0,065 X - 0,159 Y^2 + 0,00187 X^2 - 0,0095 Y^3$$

para

$$0 < X < 18 \quad 0 < Y < 3$$

Los puntos 2 y 3 dan lugar a dos factores de corrección que afectan al parámetro adimensional X y que se han colocado en el formulario "F-CHART" para aire en las columnas 12 y 13.

La columna 12 contiene un **factor de corrección por caudal**. Ello es debido a que las variaciones de caudal afectan al coeficiente F de transferencia de calor entre el fluido y la placa colectora (cosa que no ocurre con líquidos). Esta corrección vale:

$$CC = \left(\frac{m}{10} \right)^{0,28} \quad m = \text{caudal de aire l/s m}^2, \\ cc = 1 \text{ para } m = 10$$

La columna 13 contiene un **factor de corrección por volumen de almacenamiento**. Es similar al utilizado en el caso de líquidos, pero en este caso afecta al parámetro adimensional X en lugar del Y :

$$C_v = \left(\frac{V}{0,25} \right)^{-0,3} \quad V = \text{Volumen de almacenamien-} \\ \text{to } \frac{\text{m}^3 \text{roca}}{\text{m}^2 \text{panel}} \\ C_v = 1 \text{ para } V = 0,25$$

Estos dos factores se multiplican entre sí, y a su vez se multiplican por el valor de la columna para dar lugar al valor de la columna 14, que es el parámetro adimensional X referido a 1 m^2 .

EJEMPLO DE APLICACION

Se desea disponer de calefacción solar en una vivienda unifamiliar de planta baja situada en Madrid. La vivienda es de planta rectangular de $12 \times 10 \text{ m}$ de lado y 3 m de altura. La superficie de ventanas de doble vidrio es de 12 m^2 .

Las paredes de la casa constan, de interior a exterior, de una capa de yeso de 1 cm , ladrillo de tres agujeros, 5

cm de espuma de poliuretano, 2 ladrillos de 6 agujeros con 1 cm de cemento entre ellos, y una capa de cemento arrebujado exterior (Fig. 5).

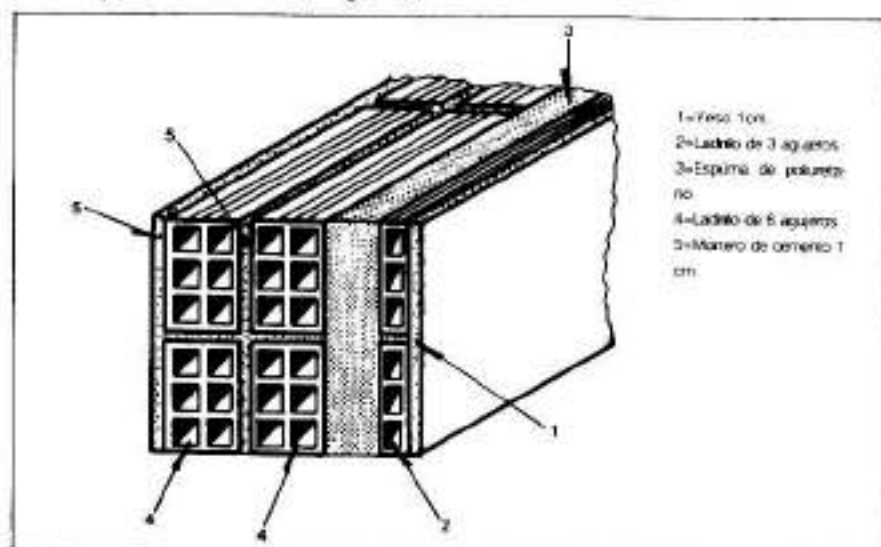


Fig. 5.- Corte de la pared del ejemplo propuesto.

El techo se considera con un coeficiente K doble del de la pared, y el suelo con uno que vale la mitad del de la pared.

El sistema de calefacción elegido es de **aire caliente**, almacenando el calor en **lecho rocoso**. Los paneles de aire tienen una recta de rendimiento que corta el eje horizontal en $0,1 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{w}$, y el eje vertical en un rendimiento de 0.7 (Fig. 6). La inclinación es de 65° . El coeficiente de renovación del aire será de 1. Las aportaciones solares a través de las ventanas se consideran igual a 2 Kwh diarios ($7,2 \text{ E}6 \text{ J}$). La temperatura de salida de los colectores es de 50° C .

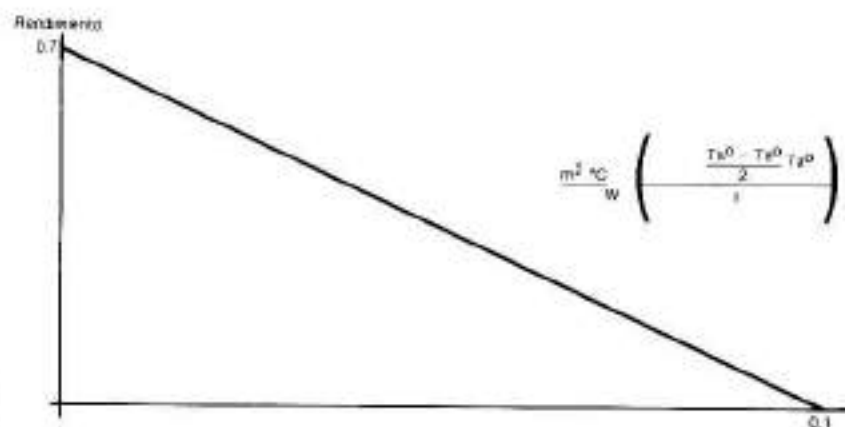


Fig. 6.- Recta de rendimiento del panel solar de aire propuesto.

El presupuesto de la instalación, calculado para 30 m^2 , asciende a 1.000.000 pts. repartidos a partes iguales (500.000 pts.) entre los gastos proporcionales a la superficie y los fijos. La vida útil de la instalación se ha estimado en 25 años. El resto de valores corresponde a los del problema de la lección 17: subvención por $\text{m}^2 = 6.000 \text{ pts.}$; interés del préstamo = 13%; duración del préstamo = 10 años; inflación general = 8%; inflación del combustible = 10%; precio actual del combustible = 30 pts/Kg; poder calorífico del combustible = 45 MJ/Kg; rendimiento de la caldera de gas = 70%; importe anual del mantenimiento y del seguro = 1% del coste total. Determinar la superficie óptima de colectores solares y el volumen de almacenamiento (Fig. 7).

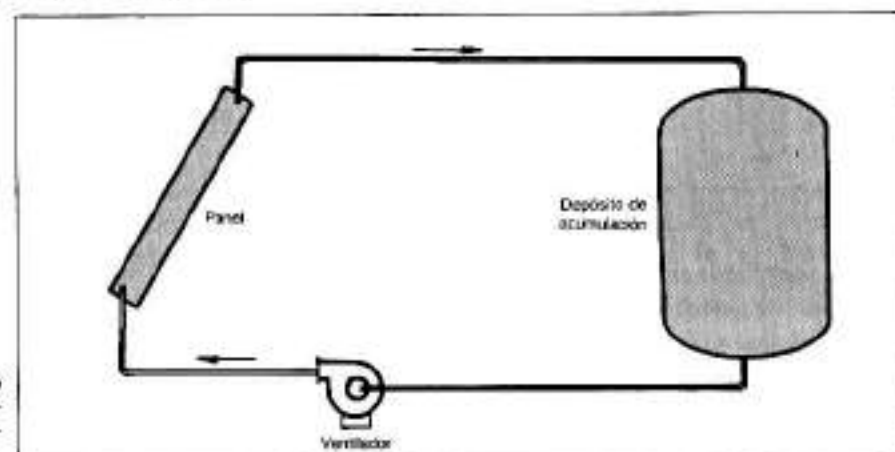


Fig. 7.- Esquema simplificado de la instalación solar de aire caliente con almacenamiento en lecho rocoso.

En primer lugar, examinamos la temporada de calefacción, entresacando a la vista de la temperatura media mensual, aquellos meses en que ésta es inferior a 15°C . Estos meses son: Enero, Febrero, Marzo, Abril, Octubre, Noviembre y Diciembre. Restando de 15° estos valores, podemos obtener los grados-día correspondientes a estos meses:

Enero:	10,1 $^\circ\text{C}$
Febrero:	8,5 "
Marzo:	5,0 "
Abril:	2,0 "
Octubre:	1,0 "
Noviembre:	6,1 "
Diciembre:	9,4 "

Seguidamente procederemos a evaluar el producto de la superficie por el coeficiente de pérdidas de calor. Calcularemos en primer lugar el coeficiente K de la pared.

Esta pared es idéntica a la del problema de la lección

anterior, excepto en que la cámara de aire ha sido sustituida por 5 cm de aislante térmico (poliestireno expandido). Este aislante térmico tiene un coeficiente de transmisión de calor de $0,0245 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$. En consecuencia, el coeficiente K de 5 cm de este material será:

$$K = \frac{0,0245 \text{ W/m } ^\circ\text{C}}{0,05 \text{ m}} = 0,49 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

Planteamos el cálculo del coeficiente K de la pared como la suma de inversos. Estos valores han sido ya examinados en la lección 20 y son: el coeficiente de convección interior, el de la capa de yeso, el del ladrillo de 3 agujeros, el del aislante térmico, el de los dos ladrillos de 6 agujeros, el de las dos capas de cemento y el coeficiente de convección de la pared exterior:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{8} + \frac{1}{30} + \frac{1}{9,1} + \frac{1}{0,49} + \frac{1}{2 \times 2,1} + \frac{1}{2 \times 140} + \frac{1}{23} = 2,60$$

$$K = \frac{1}{2,60} = 0,38 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

Obsérvese que la sustitución de la cámara de aire por 5 cm de poliestireno expandido ha reducido las pérdidas de la pared respecto al ejemplo de la lección 20 en más de cuatro veces.

Seguidamente, calculamos el coeficiente K de las ventanas de doble vidrio:

El coeficiente K de convección interior vale $8 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$.

El coeficiente K del vidrio (4 mm) vale $237,5 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$ (lección 20).

La cámara de aire entre ellos vale $4,5 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$.

El coeficiente K de convección exterior vale $23 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$.

Por lo tanto:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{8} + \frac{1}{2 \times 237,5} + \frac{1}{4,5} + \frac{1}{23} = 0,39$$

$$K = \frac{1}{0,39} = 2,54 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

La presencia de doble vidrio reduce las pérdidas de calor en más de dos veces.

Las pérdidas de calor por las paredes serán igual a su superficie. La superficie de paredes es de $2 \times (12 + 10) \times 3 = 120 \text{ m}^2$. Las pérdidas de calor por las paredes serán:

$$0,38 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C} \times 120 \text{ m}^2 = 45,6 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$



Las pérdidas a través de las ventanas serán de:

$$2.54 \text{ W/}^\circ\text{C} \times 12 \text{ m}^2 = 30.5 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Las pérdidas a través del techo son el producto de su superficie (120 m^2) por el doble del coeficiente K de las paredes:

$$= 120 \text{ m}^2 \times 2 \times 0.38 \text{ W/}^\circ\text{C} = 91.2 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Finalmente, las pérdidas por el suelo tienen un coeficiente K que es la mitad del de las paredes:

$$120 \text{ m}^2 \times 0.5 \times 0.38 \text{ W/}^\circ\text{C} = 22.8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Las pérdidas totales serán la suma de todas ellas:

$$\text{Pérdidas} = 45.6 + 30.5 + 91.2 + 22.8 = 190.1 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Este valor de 190.1 lo multiplicaremos por los grados-día de cada mes y por los segundos que hay en un mes, obteniendo el resultado en Julios:

Enero	$190.1 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \times 2.68 \text{ E6 S} \times 10.1^\circ\text{C} = 5.15 \text{ E9 J}$
Febrero	$190.1 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \times 2.53 \text{ E6 S} \times 8.5^\circ\text{C} = 4.09 \text{ E9 J}$
Marzo	$190.1 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \times 2.68 \text{ E6 S} \times 5.0^\circ\text{C} = 2.55 \text{ E9 J}$
Abril	$190.1 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \times 2.59 \text{ E6 S} \times 2.0^\circ\text{C} = 9.85 \text{ E8 J}$
Octubre	$190.1 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \times 2.68 \text{ E6 S} \times 1.0^\circ\text{C} = 5.09 \text{ E8 J}$
Noviembre	$190.1 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \times 2.59 \text{ E6 S} \times 6.1^\circ\text{C} = 3.00 \text{ E9 J}$
Diciembre	$190.1 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \times 2.68 \text{ E6 S} \times 9.4^\circ\text{C} = 4.79 \text{ E9 J}$

Seguidamente calcularemos las pérdidas por infiltración y renovación de aire. El volumen interior es de $120 \text{ m}^2 \times 3 \text{ m} = 360 \text{ m}^3$, y la energía necesaria cada hora es de:

$$E = 1300 \times 360 \text{ m}^3 (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \times 1 \text{ renovación}$$

Consideraremos la temperatura interior de 20°C , y la exterior la media mensual. Multiplicando estos valores por 24 horas y por el número de días del mes, tendremos la energía perdida por renovación del aire:

Enero	$31 \text{ días} \times 24 \text{ h} \times 1300 \times 360 \text{ m}^3 (20 - 4.9) = 5.26 \text{ E9 J}$
Febrero	$28 \text{ días} \times 24 \text{ h} \times 1300 \times 360 \text{ m}^3 (20 - 6.5) = 4.25 \text{ E9 J}$
Marzo	$31 \text{ días} \times 24 \text{ h} \times 1300 \times 360 \text{ m}^3 (20 - 10) = 3.48 \text{ E9 J}$
Abril	$30 \text{ días} \times 24 \text{ h} \times 1300 \times 360 \text{ m}^3 (20 - 13) = 2.36 \text{ E9 J}$
Octubre	$31 \text{ días} \times 24 \text{ h} \times 1300 \times 360 \text{ m}^3 (20 - 14) = 2.09 \text{ E9 J}$
Noviembre	$30 \text{ días} \times 24 \text{ h} \times 1300 \times 360 \text{ m}^3 (20 - 8.9) = 3.74 \text{ E9 J}$
Diciembre	$31 \text{ días} \times 24 \text{ h} \times 1300 \times 360 \text{ m}^3 (20 - 5.6) = 5.01 \text{ E9 J}$

A continuación, debemos calcular las aportaciones de energía solar a través de los cristales de las ventanas. Estas aportaciones se han estimado en 2 Kwh diarios. Para obtener el total mensual, multiplicaremos este valor



por el número de días al mes (1 Kwh = 1000 w x 3600 s = 1000 J/s x 3600 s = 3,6 E6 J):

Enero	$2 \times 3,6 \text{ E6} \times 31 = 2,23 \text{ E8 J}$
Febrero	$2 \times 3,6 \text{ E6} \times 28 = 2,02 \text{ E8 J}$
Marzo	$2 \times 3,6 \text{ E6} \times 31 = 2,23 \text{ E8 J}$
Abril	$2 \times 3,6 \text{ E6} \times 30 = 2,16 \text{ E8 J}$
Octubre	$2 \times 3,6 \text{ E6} \times 31 = 2,23 \text{ E8 J}$
Noviembre	$2 \times 3,6 \text{ E6} \times 30 = 2,16 \text{ E8 J}$
Diciembre	$2 \times 3,6 \text{ E6} \times 31 = 2,23 \text{ E8 J}$

El consumo mensual de calefacción será igual a la suma de las pérdidas de calor del edificio, más las pérdidas de calor de las renovaciones, menos la aportación solar. El consumo mensual vale:

Enero	1,02 E10 J
Febrero	8,14 E9 J
Marzo	5,81 E9 J
Abril	3,13 E9 J
Octubre	2,38 E9 J
Noviembre	6,52 E9 J
Diciembre	9,56 E9 J

Estos valores los colocamos en la columna 4 del formulario "F-CHART". A continuación, en la columna 5 ponemos el valor de la irradiación mensual sobre una superficie inclinada 65° en Madrid (para Enero = 11,19 MJ/m²).

Ahora debemos calcular los valores FU y F(τα) del colector. El caudal de aire que se hará circular por ellos será de 10 l/s m², por lo que habrá que calcular el coeficiente para este caudal, si bien antes hallaremos el valor de la pendiente de la recta de rendimiento:

$$\tan \Theta = \frac{-Y}{X} = -\frac{0,7}{0,1} = -7$$

Sabiendo que la densidad del aire es de 1,204 E-3 Kg/l, la masa de un caudal de 10 l/s será de:

$$10 \text{ l/s} \times 1,204 \text{ E-3 kg/l} = 1,204 \text{ E-2 kg/m}^2 \text{ s}$$

El calor específico del aire es de 1012 J/Kg. El valor del coeficiente K valdrá:

$$K = \frac{1,204 \text{ E-2 kg/s m}^2 \times 1,012 \text{ J/kg}}{1,204 \text{ E-2 kg/s m}^2 \times 1,012 \text{ J/kg} - \left(\frac{-7}{2}\right)} = 0,78$$

Por lo tanto FU = -0,78 x -7 = 5,46

y F(τα) = 0,78 x 0,7 = 0,55

Estos valores los colocamos en las columnas 7 y 8 respectivamente. La eficacia del intercambio de calor entre el aire caliente y las rocas la supondremos del 90%, por lo que escribiremos un 0.9 en la columna 9. En la columna 10 pondremos la diferencia entre 50° C (temperatura de salida del aire de los paneles y la temperatura media mensual). En la columna 11 obtenemos el valor del parámetro adimensional X referido a 1 m² de panel. Las columnas 12 y 13 se refieren a las correcciones de caudal y volumen de almacenamiento. Puesto que utilizamos los valores óptimos, no hay que hacer ninguna corrección.

A continuación, situaremos los valores de X/m^2 en la columna 14, y de $(\tau\alpha)/(\tau\alpha_0)$ para un cristal de la columna 15. La corrección de la columna 16 no es aplicable para sistemas de aire, por lo que pondremos un 1.

En la columna 17 obtenemos el valor del parámetro adimensional Y referido a 1 m². En la columna 18 colocamos un valor de superficie elegido al azar (en este caso 30 m²). Multiplicando los valores de las columnas 14 y 17 por 30, obtenemos los parámetros adimensionales X e Y (columnas 19 y 20).

Determinados ya X e Y , obtendremos ahora el valor de la fracción mensual de aportación solar f , teniendo en cuenta que su cálculo es **distinto** al preciso en los sistemas de líquido. Observamos dos hechos significativos en la obtención del parámetro f :

- **Varía mucho de un mes a otro** (cosa que no sucedía en el caso de consumos uniformes como agua caliente sanitaria). Este hecho es debido a que los consumos mensuales son muy variables.
- En dos meses (precisamente el primero y el último de la temporada de calefacción) el valor de f es **mayor** que 1. Ello significa que la aportación solar es superior al consumo. No obstante, esta energía sobrante no se utiliza puesto que, de lo contrario, convertiríamos la casa en una sauna. Por esta razón, el valor de f debe ser 1, ya que así se cumple que la aportación solar cubre el 100% de las necesidades de calefacción.

A continuación se rellenan las columnas 22 y 23. Con la suma de la 22 (aportaciones totales y la suma de la columna 4) se obtiene, dividiendo, el valor del parámetro de aportación solar anual (en este caso de la temporada de calefacción), F , que para 30 m² resulta ser de 0.5764.



En general, en sistemas de aire, los parámetros de aportación solar anual F son menores que en sistemas de líquido. Este hecho está motivado por el menor rendimiento del panel solar de aire, basado en el hecho de que el coeficiente F (factor de eficacia de intercambio de calor entre la placa y el fluido) es menor que en un panel de líquido. Esto implica que FU y $F(\tau\alpha)$ sean menores.

Por otro lado, como los sistemas de aire se emplean para calefacción, si deseamos tener un valor de la aportación solar anual F elevado, ello puede suponer que, en los primeros o últimos meses de la temporada de calefacción los valores de los parámetros adimensionales X e Y sean superiores al valor máximo para cada uno de ellos, o que en varios meses la aportación solar mensual f sea mayor que 1, lo que será señal de que el sistema está sobredimensionado.

Hemos obtenido el parámetro anual F para una instalación de calefacción con 30 m^2 de paneles solares. El valor de F obtenido es de 0,5784.

Podemos ahora pasar a rellenar el **formulario económico** de acuerdo con los datos del problema.

La primera superficie que colocamos en la columna 1 es la de 30 m^2 , a la que corresponde una fracción solar de 0,5784, valor que situamos en la columna 2.

Calculamos la función g del préstamo y de la inflación, de la forma indicada en la lección 17, y escribimos estos valores (que son idénticos a los de la lección 17).

En la columna 5 colocamos el valor de la subvención por m^2 y en la 6 el importe total de la subvención.

El presupuesto (para 30 m^2) lo situamos en la columna 7 y, deduciendo el valor de la subvención, obtenemos el valor del préstamo.

En la columna 9 ponemos el importe del préstamo que es proporcional a la superficie. Este valor es igual a la parte del presupuesto proporcional a la superficie menos el valor de la subvención.

En la columna 10 colocamos el valor del préstamo no proporcional a la superficie.



En la columna 11, escribimos el coste actualizado del préstamo. Los datos de las columnas 12, 13 y 14 son los mismos que en el caso de la lección 17.

La aportación solar anual (suma de la columna 22 del cuestionario "F-CHART"), se coloca en la columna 15.

En la columna 16 está el coste del combustible ahorrado en un año. La función g de la inflación del combustible se pondrá en la columna 17.

En la columna 18 se coloca el coste actualizado del combustible ahorrado, mientras que en la 19 pondremos la fracción de gastos proporcionales del préstamo.

El coste del mantenimiento y del seguro del primer año (que se estiman en 1% del presupuesto) se colocan en la columna 20, y en la columna 21 el coste actualizado del mantenimiento y del seguro durante toda la vida útil de las instalaciones.

Finalmente, obtenemos, restando los valores de las columnas 19 y 21 del valor de la 18, el **ahorro solar**, que para 30 m² resulta ser de 240,300 pts.

Probando con otros valores llegaremos a determinar la superficie óptima, que resultará ser de 27 m², valor que proporciona el máximo ahorro solar.

El volumen de almacenamiento en lecho rocoso será de:

$$V = 0.25 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times 27 \text{ m}^2 = 6.75 \text{ m}^3$$

eligiendo una altura del lecho rocoso de 2 m y una geometría cilíndrica, su diámetro será de:

$$r = \sqrt{\frac{6.75 \text{ m}^3}{2 \pi}} \quad r = 1.04 \text{ m} \quad D = 2.08 \text{ m}$$

Será un cilindro de 2.08 m de diámetro y 2 m de altura. El caudal de aire de los ventiladores será de:

$$C = 10 \text{ l/s m}^2 \times 27 \text{ m}^2 = 270 \text{ l/s}$$

DATOS DE INTERES

PROGRAMA PARA CALCULAR LA FRACCION SOLAR MENSUAL SEGUN EL METODO «F- CHART» PARA SISTEMAS DE AIRE

```

10 REM PROGRAMA F - CHART SIMPLIFICADO PARA AIRE. (C) J. Ribot
15 DIM F(12,23): 'F es una matriz numerica idéntica al formulario
16 DIM MESES$(12)
17 DIM E(5, 22) 'E(5, 22) es el formulario de datos económicos
22 restore 15000
23 for n = 1 to 12
24   read MESES$(n)
25 next n
30 for n = 1 to 12
40   F(n, 1) = n
50 next n
55 restore 11000
60 for n = 1 to 12
70   read y
80   F(n, 2) = y
90 next n
100 restore 12000
110 for n = 1 to 12
120   read z
130   F(n, 3) = z
140 next n
150 for n = 1 to 12
160   gosub 5000
170   input "CONSUMO MENSUAL ? (J)", i
180   F(n, 4) = i
190 next n
200 for n = 1 to 12
210   gosub 5010
220   input "IRRADIACION MEDIA DIARIA MENSUAL (MJ./m2.)", h
230   h = h * 1e6
240   F(n, 5) = h
250 next n
255 cls
256 for n = 1 to 12
257   gosub 5000
258   input "TEMPERATURA MEDIA AMBIENTE ?", ta
259   F(n, 6) = ta
260 next n
261 cls
262 input "VALOR DE LAS PERDIDAS DEL COLECTOR 'FU' ? (W/oC.)", v
270 for n = 1 to 12
280   F(n, 7) = v
290 next n
300 input "VALOR DEL PARAMETRO F(Tau - Alfa) ? ", a

```

```

310 if a > 1 then cls: goto 300
320 for n = 1 to 12
330   F(n, 8) = a
340 next n
420 input "FACTOR DE EFICACIA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR ? ", b
430 if b > 1 then cls: goto 420
440 for n = 1 to 12
450   F(n, 9) = b
460 next n
470 input "TEMPERATURA DEL AIRE CALIENTE ? (°C.) ", ts
480 for n = 1 to 12
490   F(n, 10) = ts - F(n, 6)
500 next n
530 for n = 1 to 12
540   if F(n, 4) < 0 then F(n, 1) = (F(n, 3) + F(n, 7) + F(n, 9) + F(n, 10)) / F(n, 4)
550 next n
560 input "CAUDAL DE AIRE ? (l./s2.) ", ai
570 if ai < 5 or ai > 20 then goto 560
580 ca = (ai / 10) ^ 0.28
590 input "VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO EN LECHO ROCOSO? (m3./s2.) ", v
600 if v < 0.125 or v > 1 then goto 590
610 cv = (v / 0.25) ^ -0.3
620 for n = 1 to 12
621   F(n, 12) = ca
622   F(n, 13) = cv
623 next n
630 for n = 1 to 12
640   F(n, 14) = F(n, 11) + F(n, 12) + F(n, 13)
650 next n
660 input "NUMERO DE CUBIERTAS DEL COLECTOR ? ", c
670 if c < 0 or c > 2 then cls: goto 660
680 if c = 0 then goto 710
690 if c = 1 then goto 740
700 if c = 2 then goto 770
710 F(1, 15) = 0.99: F(2, 15) = 0.99: F(3, 15) = 0.98: F(4, 15) = 0.96
714 F(5, 15) = 0.95: F(6, 15) = 0.94: F(7, 15) = 0.95: F(8, 15) = 0.95
722 F(9, 15) = 0.97: F(10, 15) = 0.98: F(11, 15) = 0.99: F(12, 15) = 0.99
730 goto 840
740 F(1, 15) = 0.96: F(2, 15) = 0.96: F(3, 15) = 0.95: F(4, 15) = 0.93
744 F(5, 15) = 0.92: F(6, 15) = 0.91: F(7, 15) = 0.92: F(8, 15) = 0.92
745 F(9, 15) = 0.94: F(10, 15) = 0.95: F(11, 15) = 0.96: F(12, 15) = 0.96
760 goto 840
770 F(1, 15) = 0.94: F(2, 15) = 0.94: F(3, 15) = 0.93: F(4, 15) = 0.91
774 F(5, 15) = 0.90: F(6, 15) = 0.89: F(7, 15) = 0.90: F(8, 15) = 0.90
782 F(9, 15) = 0.92: F(10, 15) = 0.93: F(11, 15) = 0.94: F(12, 15) = 0.94
840 for n = 1 to 12
850   if f(n, 4) = 0 then goto 860
855   F(n, 17) = (F(n, 2) + F(n, 3) + F(n, 8) + F(n, 9) + F(n, 15)) / F(n, 4)
860 next n
870 input "DE UN VALOR ALEATORIO A LA SUPERFICIE DE PANELES SOLARES (s2.) ", s
880 sk = s
890 j = 0
895 for n' = 1 to 12

```



```

896   F(n, 18) = s
897 next n
910 for n = 1 to 12
920   F(n, 19) = F(n, 14) * F(n, 18)
930   if F(n, 19) <= 18 then goto 950
940   gosub 5000
941   print "PARAMETRO ADIMENSIONAL Y NO VALIDO EN EL MES INDICADO"
942   stop
950 next n
960 for n = 1 to 12
970   F(n, 20) = F(n, 17) * F(n, 18)
980   if F(n, 20) <= 3 then goto 993
990   gosub 5000
991   print "PARAMETRO ADIMENSIONAL Y NO VALIDO EN EL MES INDICADO"
992   stop
993 next n
994 for n = 1 to 12
995   v1 = (F(n, 20))2 + 0.00187 * (F(n, 19))2 - 0.0095 * (F(n, 20))3
996   F(n, 21) = 1.04 * F(n, 20) - 0.065 * F(n, 19) - 0.159 * v1
998   if F(n, 21) > 1 then F(n, 21) = 1
1000 next n
1001 for n = 1 to 12
1002   F(n, 22) = F(n, 4) * F(n, 21)
1003 next n
1030 for n = 1 to 12
1040   F(n, 23) = F(n, 4) * F(n, 22)
1050 next n
1060 lt = 0
1070 aps = 0
1080 aa = 0
1090 for n = 1 to 12
1100   lt = lt + F(n, 4)
1110 next n
1120 for n = 1 to 12
1130   aps = aps + F(n, 22)
1140 next n
1150 f = aps / lt
1160 for n = 1 to 12
1170   aa = aa + F(n, 23)
1180 next n
1190 aps = aps / 106
1200 aa = aa / 106
1210 gosub 6000          ' Al cálculo económico
1211 print "SUPERFICIE: "; S; " m2."
1220 print "FRACCION SOLAR ANUAL: "; f
1230 print
1240 print "FRACCION SOLAR MENSUAL f:"
1250 print
1260 for n = 1 to 12
1270   print MESES$(n);
1280   print F(n, 21)
1290 next
1300 print

```



```

1310 print "AFORTACION SOLAR ANUAL: "; apn; " Mj."
1320 print "AFORTACION AUXILIAR ANUAL: "; aa; " Mj."
1340 stop
1350 cls
1360 goto 870
5000 '
5001 ' Subrutina mensual
5002 '
5010 m$ = MESES$(n)
5020 cls
5030 print m$
5040 return
6000 return ' Aquí se incluye el módulo FCHAR1
10000 '
11000 DATA 31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31
12000 DATA 2.68E6, 2.42E6, 2.68E6, 2.59E6, 2.68E6, 2.59E6
12010 DATA 2.68E6, 2.68E6, 2.59E6, 2.68E6, 2.59E6, 2.68E6
15000 DATA "ENERO", "FEBRERO", "MARZO",
15100 DATA "ABRIL", "MAYO", "JUNIO",
15210 DATA "JULIO", "AGOSTO", "SEPTIEMBRE",
15220 DATA "OCTUBRE", "NOVIEMBRE", "DICIEMBRE"

```

FORMULARIOS RELLENADOS PARA EL CASO DEL EJEMPLO:

FORMULARIO SIMPLIFICADO "F-CHART" PARA AIRE (SIQUE) →

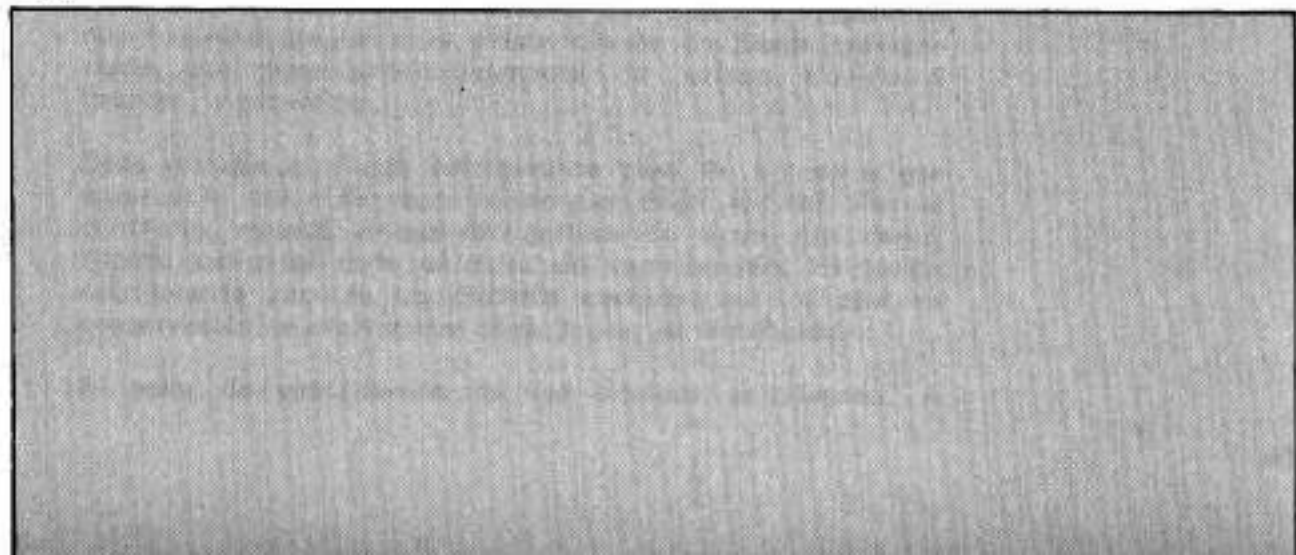
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
MES	Días por mes N	Segundo por mes s	Consumo mensual J	Irradiación media diaria mensual L/m ²	Temp. media ambiente °C	FL	F(τ+1)	B Rendim. efectivo	T ^a - T ^b °C	X / m ² $\frac{3 \cdot 7 \cdot 5 \cdot 10}{4}$	Correc. caudal	Correc. retem.
ENE.	31	2.68E6	1.02E9	11.19E6	4.9	5.46	0.55	0.9	45.1	0.0582	1	1
FEB.	28	2.42E6	8.14E8	14.27E6	6.5	5.46	0.55	0.9	43.5	0.0635	1	1
MAR.	31	2.68E6	5.81E8	16.13E6	10.0	5.46	0.55	0.9	40.0	0.0907	1	1
ABR.	30	2.59E6	3.13E8	17.29E6	13.0	5.46	0.55	0.9	37.0	0.1506	1	1
MAY.	31	2.68E6										
JUN.	30	2.59E6										
JUL.	31	2.68E6										
AGO.	31	2.68E6										
SEP.	30	2.59E6										
OCT.	31	2.68E6	2.38E9	14.31E6	14.0	5.46	0.55	0.9	36.0	0.1992	1	1
NOV.	30	2.59E6	6.52E8	12.40E6	9.9	5.46	0.55	0.9	41.1	0.0802	1	1
DIC.	31	2.68E6	9.58E8	12.71E6	5.6	5.46	0.55	0.9	44.4	0.0610	1	1
TOTAL			4.58E10									



FORMULARIO ECONOMICO "F-CHART" (2ª parte)

12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Precio del combust.	Poder calorífico M.J.	Rendim. calefac. M.J.	Aportación solar anual M.J.	Coste del comb. ahorr. en 1 año $\frac{12 \cdot 15}{17 \cdot 16}$	g inflació combust.	Coste actual del comb. ahorrado 16-17	Fracción de gastos prop. del préstam. $\frac{9}{8} - 71$	Manten. + seguro de falle $\frac{9}{8} - 20 + vu.$	Coste actual del manten. + seguro $\frac{9}{8} - 20 + vu.$	AHORRO SOLAR 18 - 15 - 21
30	45	0,7	2,50E10	25.206	29,1	733.573	395.711	10.000	97.560	240.300
30	45	0,7	2,65E10	26.289	29,1	765.102	422.092	10.333	104.807	238.202
30	45	0,7	2,53E10	24.090	29,1	701.101	389.330	9.686	90.372	241.389
30	45	0,7	2,47E10	23.620	29,1	681.515	366.140	9.500	86.802	241.573
30	45	0,7	2,41E10	22.942	29,1	667.697	342.949	9.333	83.247	241.501

LECCION 23





23. LA BOMBA DE CALOR POR ENERGIA SOLAR

INTRODUCCION

La utilización de una máquina frigorífica presenta notables ventajas de ahorro energético para usos de calefacción y aire acondicionado. En particular, el empleo de una bomba de calor (máquina frigorífica funcionando al revés) alimentada por energía solar es de gran interés en las referidas aplicaciones.

FUNDAMENTO DE LA BOMBA DE CALOR

En la lección anterior vimos que los sistemas de calefacción por energía solar presentaban menores tasas de utilización y de amortización que los de agua caliente sanitaria debido a su consumo irregular a lo largo del año. Por otra parte, estas instalaciones de calefacción no se utilizan durante el verano.

Todos estos problemas se pueden solucionar empleando la **bomba de calor**, la cual, dado que en principio es reversible, puede proporcionarnos calefacción en invierno y refrigeración en verano.

La **bomba de calor** es, en síntesis, una **máquina frigorífica** que funciona gracias a la existencia de un **fluido refrigerante** que pasa alternativamente de estado líquido a gaseoso, y viceversa.

Cada vez que el fluido refrigerante pasa de líquido a gas absorbe el calor de vaporización (es decir enfría). Por el contrario, cuando el gas refrigerante se licua, (es decir, cuando calienta) cede el calor de vaporización. El fluido refrigerante recorre un **circuito cerrado**, por lo que su conservación, a menos que haya fugas, es indefinida.

El calor de vaporización de los líquidos es elevado. A

todos nos es familiar el hecho de que si nos ponemos unas gotas de alcohol sobre la piel y soplamos (para favorecer la evaporación), sentimos una sensación de frío.

Una máquina frigorífica consta de un circuito cerrado formado por una red de tuberías donde el fluido frigorífico pasa de líquido a gas. Además, las presiones en las diversas partes del circuito son diferentes. Para variarlas se precisa una bomba, que aumentará la presión, y una válvula reductora de presión (Fig. 1).

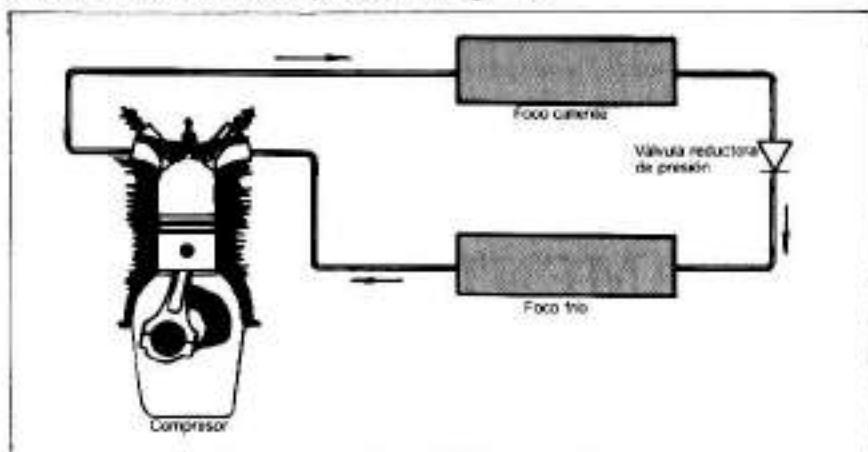


Fig. 1.- Esquema de una máquina frigorífica.

Una máquina frigorífica consta de un **foco caliente**, donde se disipa el calor, y un **foco frío**, donde aquél se absorbe. El foco caliente se llama **condensador**, por ser el lugar en el que el gas se condensa transformándose en líquido, y donde cede el calor de vaporización. El condensador está siempre a alta presión.

El **foco frío** se llama **evaporador** y es el lugar en el cual el líquido se evapora, absorbiendo el calor de vaporización. El evaporador está siempre a baja presión.

Para completar el circuito se precisa de un **generador** o **compresor**, que es el que aportará la energía de bombeo, y de un reductor de presión.

Podemos ver todos estos elementos en nuestro frigorífico doméstico. El **generador** lo constituye el **compresor**, situado en la parte inferior y formado por un recipiente de acero herméticamente cerrado. El compresor es el elemento que proporciona la energía al sistema. Seguidamente encontramos el **condensador** (foco caliente), constituido por un haz de tubos con aletas situados en la parte posterior del frigorífico. El **reductor de presión**

suele ser un tubo capilar que provoca una pérdida de carga elevadísima, y que se introduce en el congelador, que es el foco frío (evaporador). El gas que sale del congelador es absorbido de nuevo por el compresor, cerrándose el ciclo (Fig. 2).

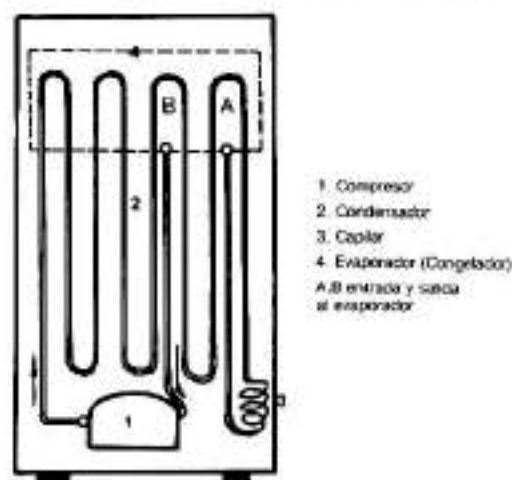


Fig. 2.- Frigorífico doméstico visto por detrás.

El rendimiento energético puede examinarse desde el punto de vista del foco frío o del foco caliente. El rendimiento energético expresa el cociente entre la energía cedida por el sistema y la absorbida por éste, y suele llamársele en este tipo de máquinas COP (del inglés Coefficient Of Performance).

El COP de una nevera doméstica será:

$$\text{COP} = \frac{\text{Energía absorbida en el congelador}}{\text{Energía eléctrica suministrada}}$$

y es, evidentemente, menor que 1.

En cambio, si desmontásemos la nevera y colocásemos el congelador en la parte exterior del edificio y el condensador en el lugar de la estufa, el COP sería de:

$$\text{COP} = \frac{\text{Energía cedida en el condensador}}{\text{Energía eléctrica suministrada}}$$

El COP en este caso es siempre mayor que 1, es decir, la máquina tiene un rendimiento energético superior al 100%.

Este hecho que puede parecernos paradójico no vulnera

ningún principio fundamental de la Física o de la Termodinámica. Lo que ocurre es que el congelador situado en el exterior del edificio **absorbe** calor (lo introduce en la máquina frigorífica) y el condensador **cede** este calor más el producido por los rozamientos mecánicos del mismo (Fig. 3).

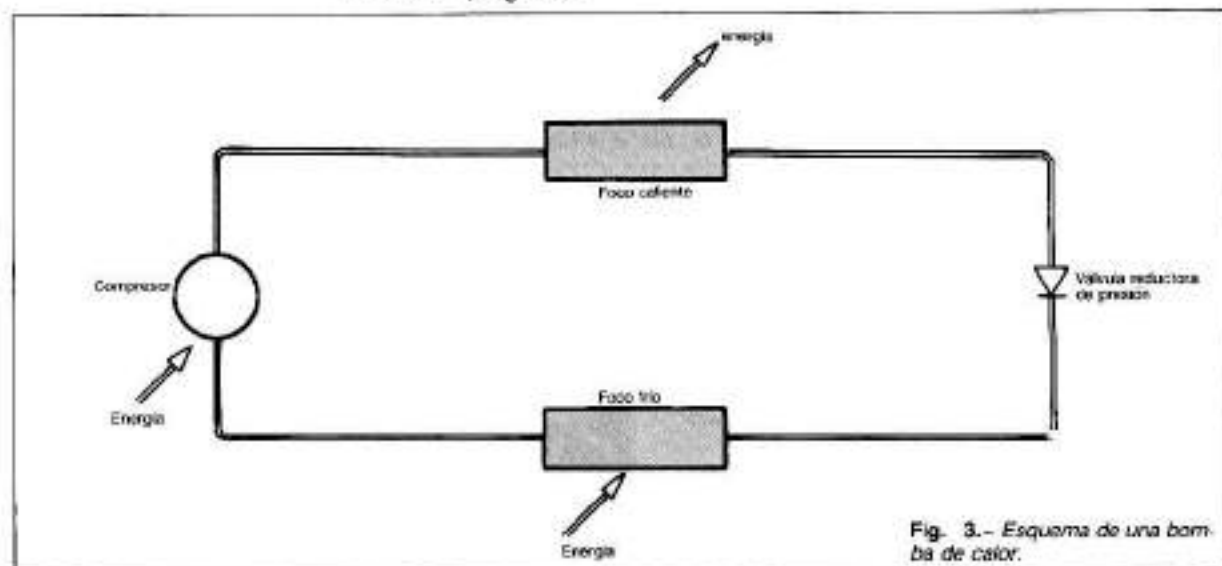


Fig. 3.- Esquema de una bomba de calor.

La máquina frigorífica en esta disposición se ha convertido en una **bomba de calor**, pues mediante una aportación energética externa (por ejemplo, de electricidad), **bombea** el calor desde el exterior al interior.

Así, pues, una **bomba de calor** es una **máquina frigorífica** que extrae calor de un **foco frío** y lo cede a un **foco caliente**.

El rendimiento energético de una bomba de calor es, en condiciones normales de funcionamiento, mayor que 1. Así, una bomba de calor con un COP de 3 (300% de rendimiento), por cada Kwh gastado en electricidad nos proporciona 3 Kwh de calor, a base de extraer 2 Kwh del foco frío y trasladarlos al foco caliente, donde se le suma 1 Kwh de la energía empleado en su funcionamiento.

Como puede comprobarse, las ventajas de semejante máquina son considerables, pues puede facilitarnos un importante **ahorro energético** (Fig. 4).

Con estos conocimientos estamos en condiciones de saber qué le pasaría a la temperatura de una habitación

aislada térmicamente, dentro de la cual se deja una nevera con la puerta abierta y funcionando (con la luz interior desconectada). La respuesta a esta pregunta clásica es que la temperatura de la habitación aumentará en la misma medida que si se hubiese colocado un elemento calefactor que hubiera absorbido la misma energía eléctrica que la nevera.

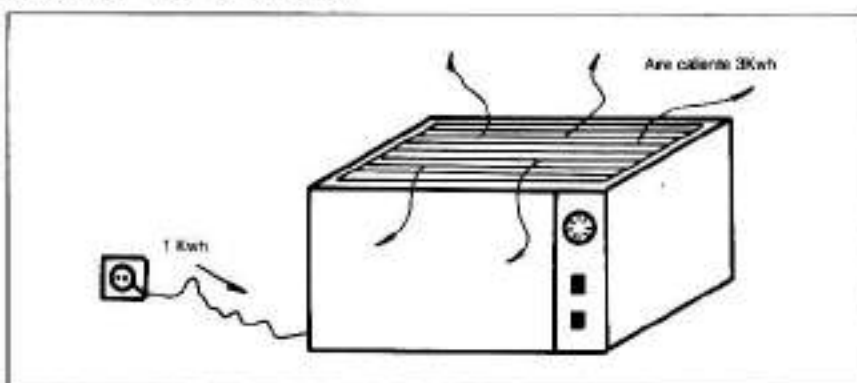


Fig. 4.- Ahorro energético en la calefacción de una bomba de calor COP=3

BOMBA DE CALOR POR COMPRESION

Aunque a la bomba de calor por compresión no le es aplicable la energía solar en el compresor, explicaremos su funcionamiento por ser mucho más sencillo, al tiempo que veremos que podemos aumentar su rendimiento energético (COP) aportando calor al foco frío. Este calor puede ser de origen solar.

De la fórmula de obtención del COP puede demostrarse que el COP es también igual a:

$$\text{COP} = \frac{T^{\circ}_c}{T^{\circ}_c - T^{\circ}_f}$$

T°_c = Temp. foco caliente.
 T°_f = Temp. foco frío.
 (en grados kelvin).

En esta fórmula se observa que si la temperatura del foco frío está próxima a la del foco caliente, el COP puede ser muy elevado, con lo que la bomba de calor funcionará con gran eficacia. Sin embargo, esta situación no suele ser interesante, pero existe la posibilidad de aumentar la temperatura del foco frío mediante la aportación de energía solar, como podría ser mediante agua caliente a temperaturas no muy altas (por ejemplo 40°C) (Fig. 5).

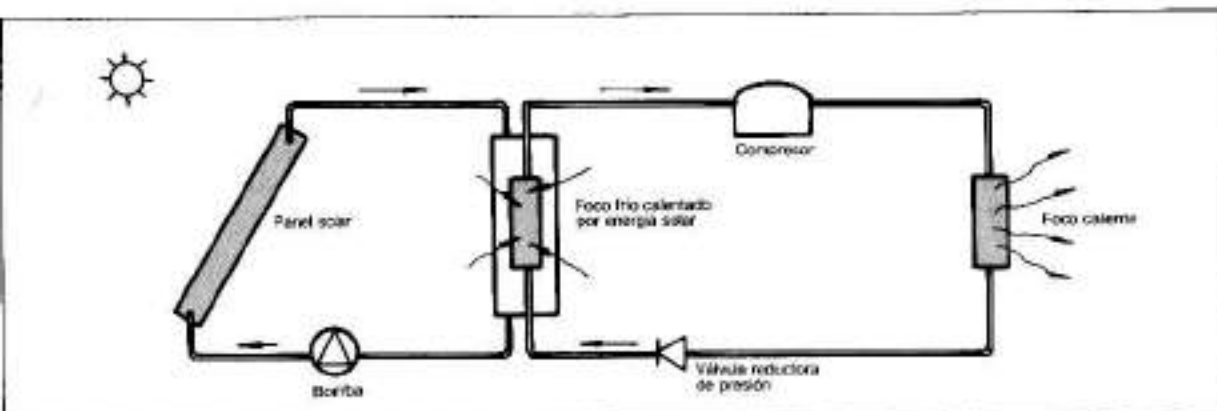


Fig. 5.- Bomba de calor alimentada en el foco frío por energía solar. En estas condiciones, el COP puede ser muy elevado.

Una máquina de este tipo consistiría en un evaporador que estaría bañado por agua caliente procedente del sistema solar. Un compresor eléctrico accionaría el sistema, y el foco caliente podría estar formado por convectores de calefacción, suelos radiantes, "fan-coils", un serpentín dentro de un depósito de agua caliente sanitaria, etc. Si se consigue que la bomba de calor trabaje con un COP elevado, el consumo de energía eléctrica es pequeño y el sistema aporta más energía calorífica que la que se obtiene de los paneles solares.

Una bomba de calor por compresión consiste en un compresor (generalmente de émbolo) accionado mecánicamente. La fuente de propulsión es, por lo común, un motor eléctrico, pero puede ser también un motor diesel, una turbina de vapor, etc.

El compresor toma el fluido refrigerante en estado de gas a baja presión y lo comprime **adiabáticamente**. (La compresión adiabática consiste en que el fluido que se comprime no intercambia calor con el exterior durante su compresión, debido a la rapidez con que se realiza). Como consecuencia de esta compresión adiabática, el gas refrigerante se **calienta** (al igual que ocurre con el aire en un motor diesel).

Este gas caliente abandona el compresor provisto de una **alta presión** y se dirige hacia el **foco caliente** (condensador). Ya hemos dicho que el foco caliente podía ser cualquier elemento disipador de calor. En el foco caliente, este gas se **enfía** y, sin perder la alta presión a que está sometido, se **licúa**, desprendiendo gran cantidad de calor.

Una vez ya frío y en estado líquido, este refrigerante

debe reducir su presión, hecho que se consigue mediante una **válvula termostática**, que conectada a un termostato instalado en el foco frío, abre o cierra el paso del líquido a presión. En equipos domésticos, la función de la válvula termostática la realiza un largo tubo capilar que provoca una enorme pérdida de carga.

Una vez a baja presión, el refrigerante **en estado líquido** entra en el **foco frío** (el evaporador). Debido a la baja presión allí existente (motivada por la continua aspiración del compresor), el líquido refrigerante se **evapora**, absorbiendo gran cantidad de calor y, por consiguiente, enfriando el recinto. El gas frío a baja presión es de nuevo aspirado y comprimido por el compresor, renaudándose el ciclo (Fig. 6).

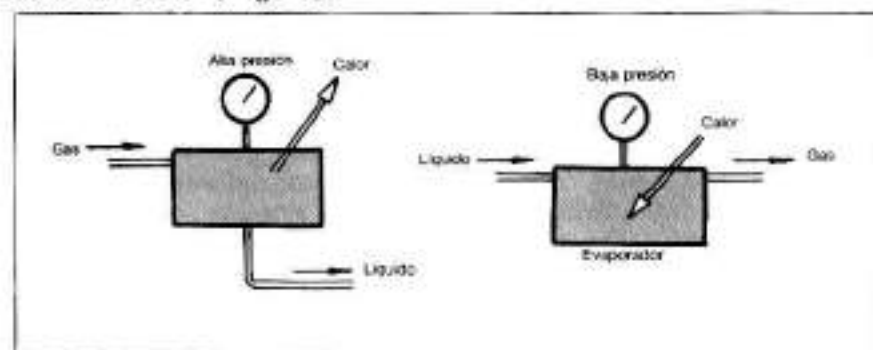


Fig. 6.- Diferencias entre un condensador (foco caliente) y un evaporador (foco frío)

De lo anteriormente expuesto se desprende que en el **foco caliente** hay una necesidad de **evacuar** el calor y en el **foco frío** de **aportar** calor. Si se aislaran térmicamente los focos caliente y frío -o uno de ellos-, la bomba de calor no podría funcionar, puesto que necesita realizar un trasvase continuo de calor desde el foco frío al caliente.

Queda bien clara la necesidad de aportar calor al foco frío, preferentemente a baja temperatura, y de extraer el calor del foco caliente, preferentemente a temperaturas no muy altas.

Estas dos necesidades se ajustan perfectamente al caso de la energía solar: se aporta al foco frío calor de baja temperatura de origen solar con todas las ventajas que ello supone: alto rendimiento de los paneles, menores espesores de aislamiento y menor corrosión, mientras que en el foco caliente debe extraerse el calor, de modo que la temperatura del foco caliente sea un poco superior a la del foco frío. Esta temperatura es ideal para aplicaciones de calefacción y agua caliente sanitaria.

Por ejemplo: el agua caliente solar se podría servir a 40° C al foco frío (que sería un serpentín o un intercambiador de calor), mientras que el foco caliente podría ser un "fan-coil" que estuviera a una temperatura de 50° C. El COP resultaría entonces muy elevado.

LA BOMBA DE CALOR POR ABSORCIÓN

Una máquina frigorífica también puede funcionar sin necesidad de un compresor mecánico. Tal es el fundamento de las **máquinas frigoríficas de absorción**, cuyos ejemplos más representativos son las neveras que funcionan con gas butano.

En una máquina frigorífica de absorción, el compresor mecánico se sustituye por el conjunto **generador-absorbedor**, que hace las veces de compresor. El resto de la instalación es igual, constando del foco caliente (condensador), de una válvula reductora de presión y del foco frío (evaporador).

En las máquinas de absorción, en lugar de un único refrigerante, hay dos fluidos: **el refrigerante y el absorbedor**. Los fluidos mas usados son el amoníaco-agua y el agua-bromuro de litio.

El funcionamiento de una máquina frigorífica de absorción es el siguiente: (caso de amoníaco-agua).

En el generador se aporta calor a alta temperatura mediante un foco calorífico. El generador es, de hecho, una caldera en la que se hace hervir la mezcla de amoníaco y agua. Debido a que el amoníaco es **más volátil** que el agua, éste se elimina preferentemente en forma de vapor, mientras que el agua líquida permanece en el generador (Fig. 7).

Este vapor de amoníaco (casi puro) a alta presión pasa a un condensador (foco caliente), donde se enfría y se hace líquido desprendiendo gran cantidad de calor; este amoníaco líquido atraviesa una válvula reductora de presión y pasa al evaporador (foco frío) donde se evapora, absorbiendo calor. Este vapor de amoníaco a baja presión pasa al **absorbedor**, que es un recipiente en el cual se mezcla con líquido procedente del generador (agua casi pura, pues el amoníaco se ha evaporado en el generador

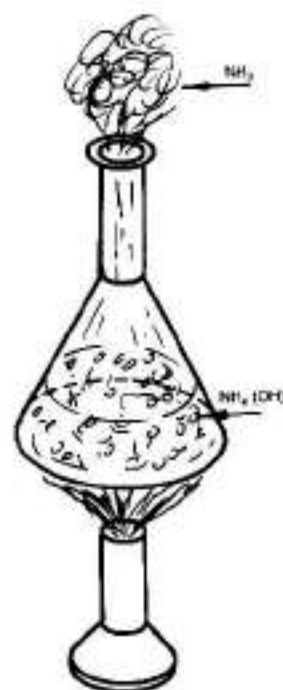
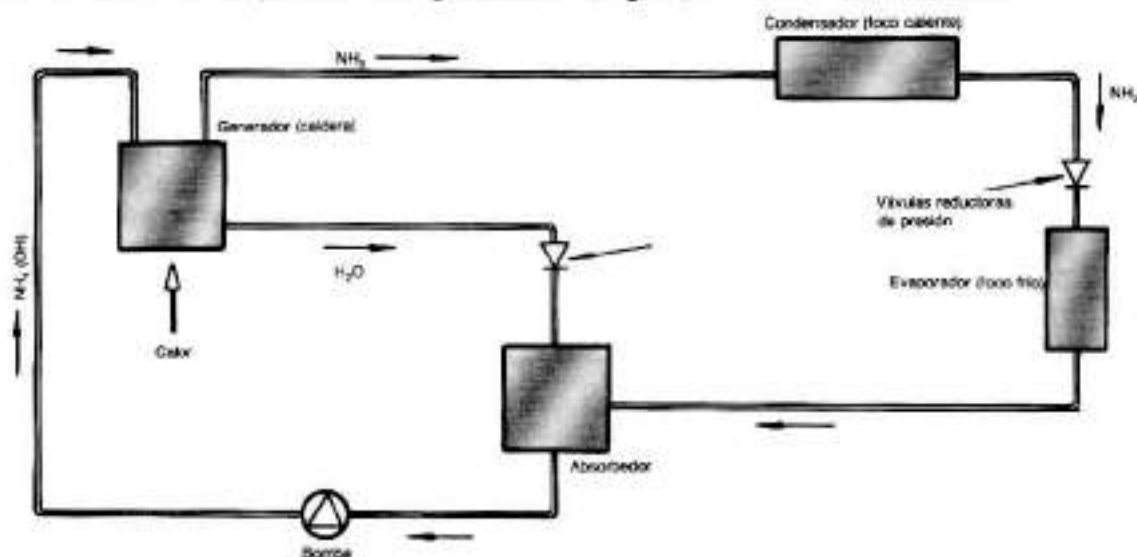


Fig. 7.- Al calentar una solución de hidróxido amónico se desprenden vapores de amoníaco puro (NH_3), empobreciéndose el contenido de amoníaco.

debido a que es más volátil que el agua). Aquí, en el absorbedor, se juntan otra vez el amoníaco y el agua formando una solución amoniacal, la cual está a baja presión (entre el generador y el absorbedor hay otra válvula reductora de presión).

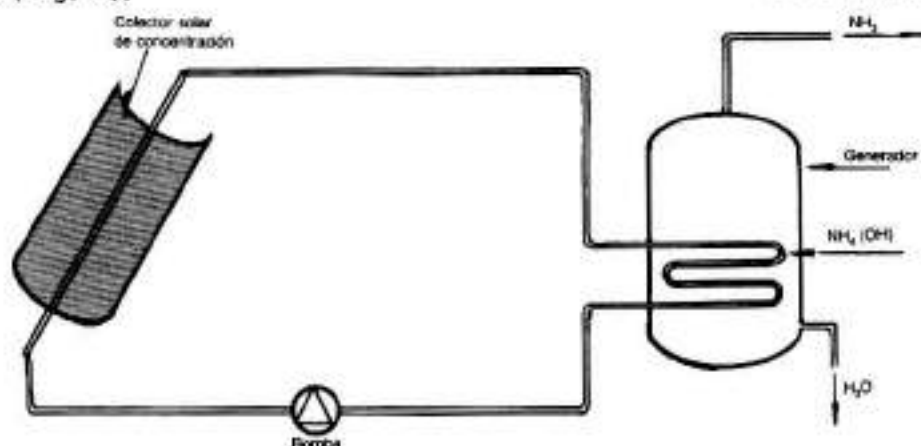
Esta solución amoniacal se bombea de nuevo al generador para repetir el ciclo. En este bombeo, la presión aumenta hasta el valor de la presión del generador (Fig. 8).

Fig. 8.— Ciclo frigorífico de absorción. El compresor mecánico es sustituido por el conjunto generador-absorbedor. La potencia mecánica de la bomba es despreciable. En el generador se produce la reacción $\text{NH}_4(\text{OH}) \rightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$, mientras que en el absorbedor tiene lugar la reacción inversa.



La aplicación de una bomba de calor por absorción requiere la presencia de un **foco calorífico a alta temperatura** (unos 120°C , como mínimo). Estas altas temperaturas hacen que tales sistemas precisen colectores de concentración, puesto que los planos son incapaces de conseguirlas o bien las consiguen con un rendimiento muy bajo (Fig. 9).

Fig. 9.— En un sistema de absorción el generador debe calentarse mediante colectores a 120°C como mínimo.



Este hecho ha motivado que las bombas de calor por absorción no estén comercializadas de forma general como ocurre con las de compresión. Sin embargo, el empleo de una bomba de calor por absorción, recurriendo a colectores de concentración, ofrece algunas ventajas respecto a los de compresión, tales como:

- Fácil posibilidad de disponer de agua caliente sanitaria y calefacción con sólo dividir el condensador (foco caliente) en dos partes, una pequeña formada por un serpentín dentro de un depósito acumulador de agua caliente sanitaria, y otra grande formada por el elemento o elementos calefactores como un "fan-coil". En el caso de la bomba de calor por compresión, esto también podía hacerse, pero era preferible disponer de una instalación independiente de agua caliente sanitaria (Fig. 10).

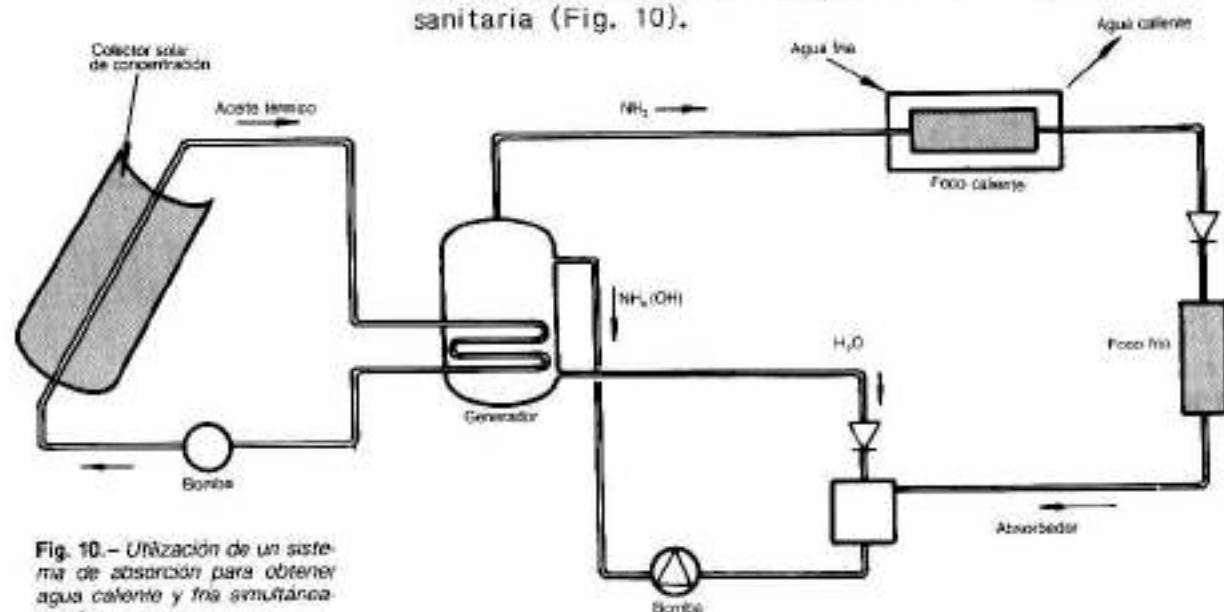


Fig. 10.- Utilización de un sistema de absorción para obtener agua caliente y fría simultáneamente.

- Disponibilidad de poder obtener **aire acondicionado en verano**, además de la calefacción en invierno. Esta **ventaja decisiva** no la tiene el sistema de compresión, pues para obtener aire acondicionado en verano precisaría consumir energía eléctrica, dejando a un lado el sistema solar. La posibilidad de poder utilizar la instalación de calefacción - aire acondicionado hace que sea **mucho más atractiva**, pues en ella no se presentan los problemas de estacionalidad que vimos en la lección anterior en el caso de calefacción.
- Funcionamiento sumamente **silencioso** de la instalación, hecho que es importante en instalaciones situadas en

viviendas, donde un compresor de cierta potencia resulta excesivamente ruidoso.

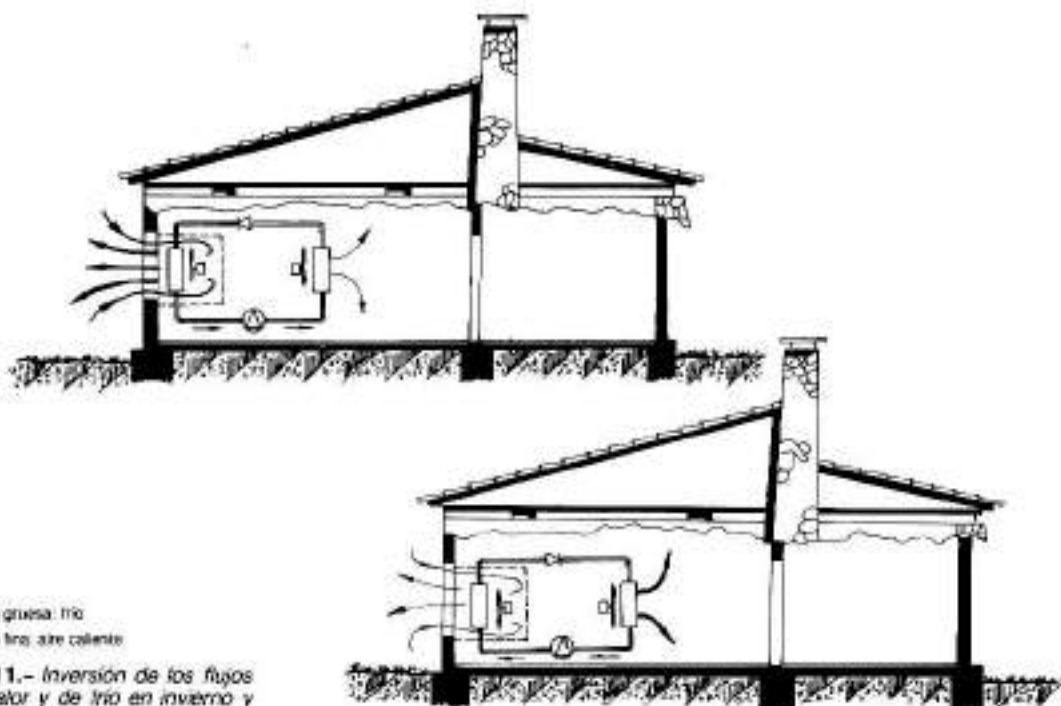
- Los inconvenientes del sistema de absorción son, en primer lugar, la escasa disponibilidad de colectores solares de concentración en el mercado y un mayor precio de la bomba de calor.

FUNCIONAMIENTO GENERAL DE LAS BOMBAS DE CALOR

Las bombas de calor están ampliamente extendidas, pues la inmensa mayoría de equipos de aire acondicionado son en realidad bombas de calor, debido a su **reversibilidad**.

Esta **reversibilidad** puede hacerse de dos maneras:

- Intercambiando los flujos de calor y frío, y manteniendo fija la instalación (Fig. 11).



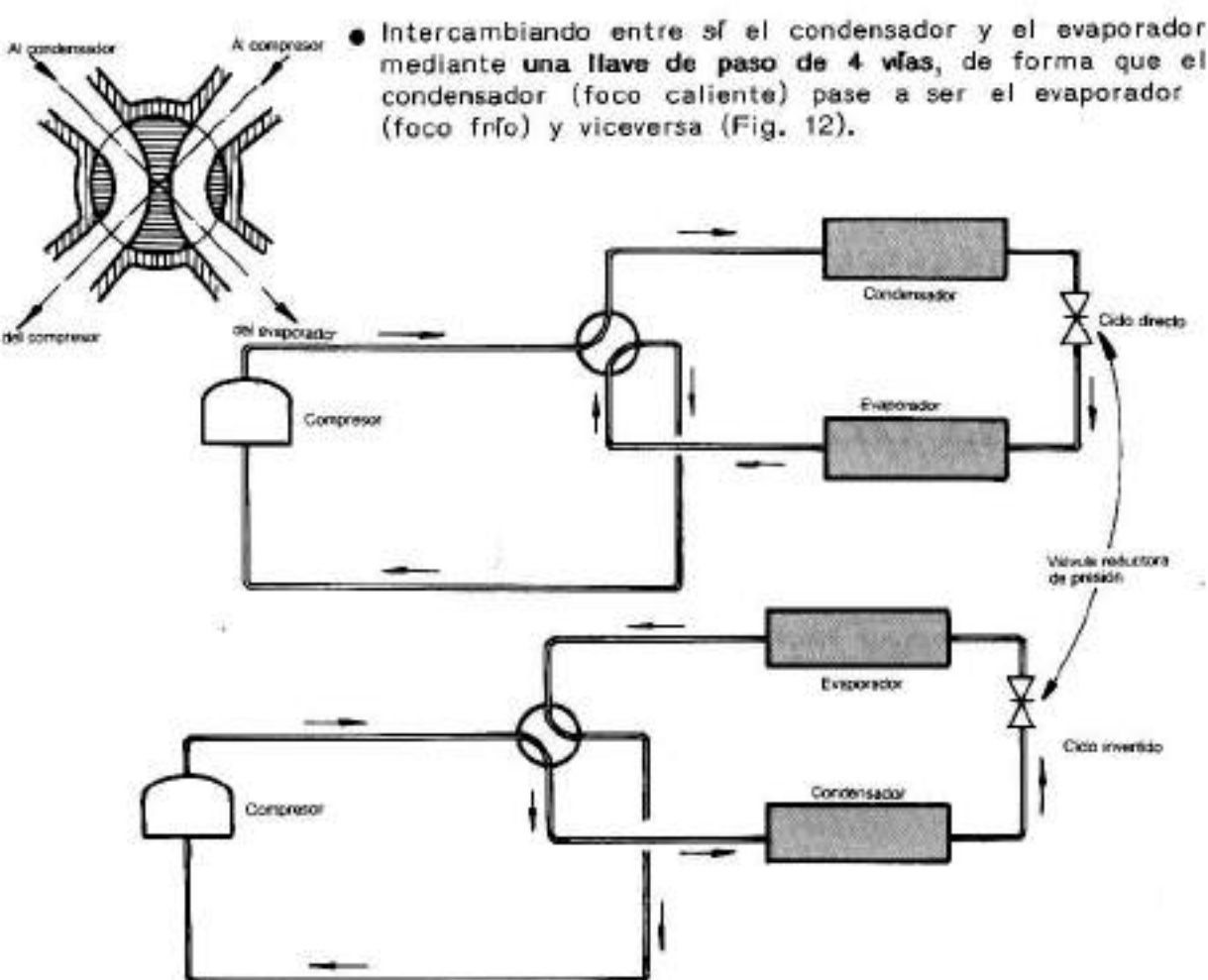


Fig. 12.- Utilización de la llave de paso de dos vías.

La primera solución es más económica, pues el equipo es sencillo. Exige disponer de un dispositivo que separe entre sí los flujos de calor y frío. Lo más habitual en calefacción es que las bombas de calor se dediquen a calentar aire. En este caso, el condensador y el evaporador pueden ser dos fan-coils. Mediante una adecuada disposición de los conductos se puede hacer que, según interese, el flujo de aire que entre en la casa sea caliente o frío.

La segunda solución (intercambiar los papeles del condensador y del evaporador entre sí mediante una llave de paso de 4 vías) exige un diseño especial de la bomba de calor, pues, en general, las características del condensador y del evaporador son distintas (piénsese en las grandes diferencias que hay entre los tubos con aletas que circulan por la parte posterior de nuestro frigorífico (conden-

sador) y la forma del congelador). Esta solución implica un COP efectivo algo inferior, dado que las características del condensador y del evaporador no son óptimas y la bomba de calor resulta algo más cara.

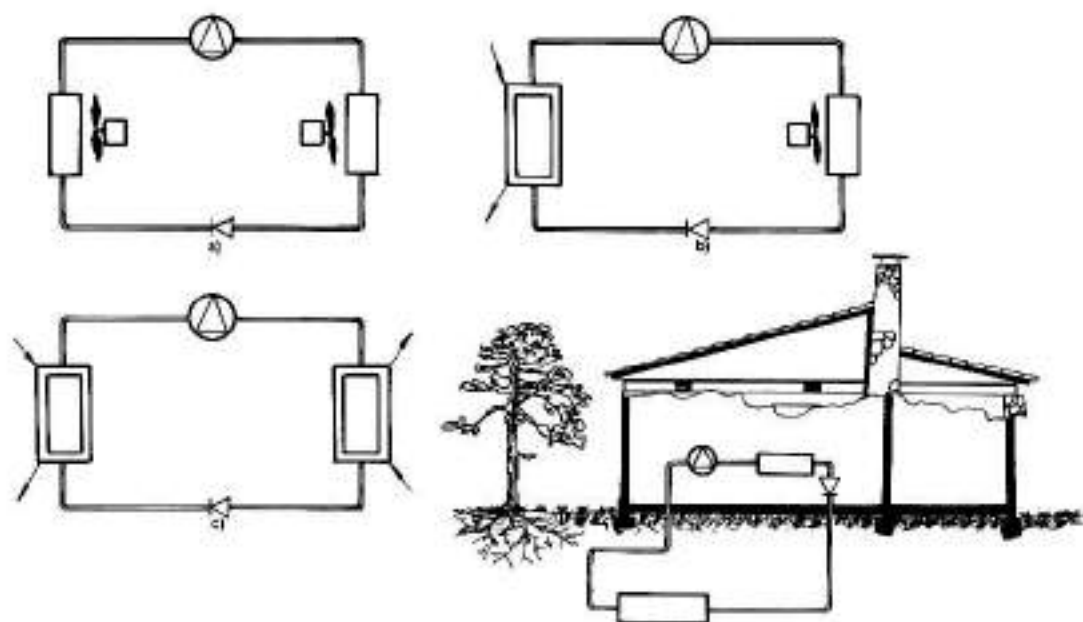
No obstante, este sistema tiene otro inconveniente: a veces no es factible realizar de forma eficiente la inversión debido al problema de las condensaciones, pues si, por ejemplo, hacemos pasar agua muy fría en verano a través de convectores de calefacción, lo más probable es que, efectivamente, enfríen la habitación pero dejen un charco de agua, provocado por la **condensación** de la humedad ambiente junto al convector.

En utilización de bombas de calor, tanto si es para calefacción como para refrigeración, el mejor sistema de calefacción es el de **aire caliente** o acondicionado. El uso de suelo radiante o convectores debe reservarse exclusivamente para calefacción y nunca para refrigeración.

Las bombas de calor se clasifican según que el evaporador y el condensador tomen y cedan el calor de distintos medios. (En este orden: primero el evaporador (foco frío) y luego el condensador (foco caliente)).

Así, las bombas de calor pueden ser aire-aire, agua-aire, aire-agua, agua-agua, tierra-aire y tierra-agua (Fig. 13).

Fig. 13.- Bombas de calor aire-aire(a), agua-aire(b), agua-aire(c) y tierra-aire(d).



Las bombas de calor aire-aire son las más corrientes para equipos pequeños. Las agua-aire y agua-agua son interesantes si se dispone de un caudal de agua continuo del que se pueda extraer calor, tal como un río, pozo, agua residual de un proceso de fabricación, etc. Un ejemplo de posible aplicación de este caso (evaporador calentado con agua) lo puede constituir una industria que precise agua caliente.

La bomba de calor (agua-agua, en este caso) puede alimentarse por el evaporador con el agua templada que se recoge por los desagües una vez realizado el proceso. De esta forma, el condensador está en condiciones de calentar agua en un depósito de almacenamiento, para ser de nuevo utilizada. La bomba de calor bombea efectivamente, recuperando calor de baja temperatura a calor de alta temperatura.



La bomba de calor que emplea tierra como agente que proporciona calor al evaporador, consiste en un evaporador

formado por un haz de tubos enterrados entre 1 y 2 m de profundidad. Debido a la poca conductividad térmica de la tierra, estas bombas son siempre de escasa potencia.

Un problema general que se presenta en las bombas de calor (y en cualquier máquina frigorífica) es el del **escarche**, que obliga a realizar **descongelaciones** periódicas.

En las bombas de calor en las que el evaporador es calentado con aire, si la temperatura de éste desciende excesivamente, la humedad del aire puede condensarse, formándose gotitas de agua, y posteriormente solidificarse, formando escarcha o hielo. Esta escarcha se va difundiendo entre las aletas de los tubos del evaporador haciendo que el aire que impulsa el ventilador no tome contacto íntimo con las aletas. Además, el hielo es mal conductor del calor, por lo que a medida que el espesor de la escarcha crece, la eficacia de absorción de calor en el evaporador disminuye, la temperatura del foco caliente (condensador) disminuye también, y el COP asimismo disminuye (Fig. 14). Si el evaporador utiliza agua, pueden producirse **manguitos de hielo** que rodeen a los tubos del evaporador, y, si es del sistema de tierra, puede dar lugar a la congelación del agua de humedad contenida en la tierra, originándose una congelación de la zona de tierra próxima a los tubos del evaporador. Para evitar el escarche se procede a **descongelar periódicamente el circuito**. Esta descongelación se puede hacer de tres maneras diferentes:

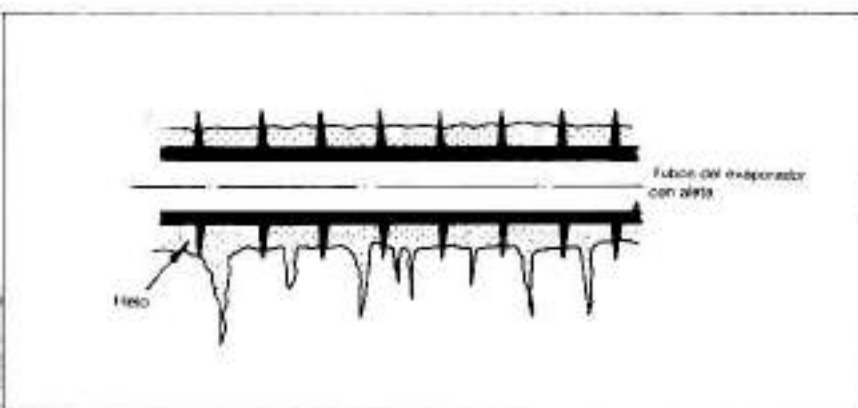


Fig. 14.— La presencia de hielo en el evaporador impide a éste poder absorber de forma efectiva.

- Parando la instalación y esperando a que se descongele sola,
- Colocando **resistencias eléctricas** en el evaporador y

conectándolas durante el desescarche.

- **Invertiendo** durante unos momentos el ciclo de la máquina, de forma que el evaporador pase a funcionar como condensador.

La primera solución no es en general aceptable, pues supondría dejar la bomba de calor parada durante largo tiempo. La colocación de resistencias eléctricas (debidamente blindadas) en el evaporador es una solución sencilla que se emplea en equipos pequeños, debido a su rapidez y al hecho de que el consumo de energía eléctrica por esta causa es pequeño.

En bombas de calor grandes se emplea la **inversión del ciclo**, pues de utilizarse resistencias eléctricas su potencia debería ser excesiva.

Debe hacerse notar que esta inversión de ciclo no necesariamente comporta que la bomba de calor sea del tipo que intercambie entre sí el evaporador y el condensador.

La bomba de calor puede **invertir el ciclo sólo para descongelar**, mientras que su evaporador y condensador sean, en condiciones de trabajo normal, el foco frío y caliente, respectivamente.

La inversión del ciclo, tanto para descongelar como en el caso de una reversibilidad de los focos fríos y calientes, no puede hacerse con la bomba de calor funcionando, pues la presión del condensador es mucho más alta que la del evaporador. Para hacer esta operación debe pararse la bomba de calor mientras funciona, pues la presión del condensador es mucho más alta que la del evaporador.

Para hacer esta operación debe desconectarse la bomba de calor y **esperar** el tiempo necesario (2 ó 3 minutos, generalmente) para que las presiones del condensador y evaporador se igualen entre sí. Entonces, mediante la llave de paso de 4 vías, se invierte el ciclo y se pone en marcha. Una vez terminada la descongelación, debe repetirse la operación anterior, pero en sentido inverso: parar la bomba de calor, esperar a que se igualen las presiones del evaporador y condensador, accionar la llave de paso de 4 vías y poner en marcha la bomba de calor.

En las instalaciones grandes estas operaciones se realizan automáticamente, de forma periódica, mediante el uso de relojes temporizados.



DATOS DE INTERES

FLUIDOS REFRIGERANTES USUALES

Nombre	Fórmula	P. ebullición (°C)
Amoníaco	NH ₃	-33
R - 11	CF Cl ₃	+24
R - 12	F F ₂ Cl ₂	-30
R - 22	Ch F ₂ Cl	-41
R - 113	C ₂ H ₂ F ₃ Cl	+7,5
Nombre	Presión a 30°C(P)	Peligrosidad
Amoníaco	1,2 E4	2
R - 11	1,29 E3	5
R - 12	9,39	6
R - 22	1,24 E4	5
R - 113	2,26 E3	4

NOTA: La peligrosidad se refiere a la inhalación de sus vapores, y la cifra asignada es mayor cuanto menor es su índice de peligrosidad. El amoníaco es el más peligroso, si bien su olor característico hace que se le detecte a concentraciones mínimas. El R - 12 es el refrigerante usual para las neveras domésticas y equipos de aire acondicionado, debido a la escasa peligrosidad que presenta.