

## Capítulo 2

# Principios fundamentales de paredes Trombe y chimeneas solares

### 2.1 Introducción

Dentro de los sistemas que pueden incorporarse a los edificios para dar solución a problemas tanto de clima como de luz, englobados dentro de la llamada Arquitectura Bioclimática, podemos encontrar las paredes Trombe y las chimeneas solares, sistemas que nos ocupan en este proyecto.

En primer lugar se hará una aproximación a la arquitectura bioclimática y a los sistemas climáticos especiales utilizados en esta disciplina, posteriormente nos centraremos en las particularidades de los sistemas pasivos pared Trombe y chimenea solar. En el apartado referido a chimeneas solares también se expondrá de forma introductoria su aplicación como plantas generadoras de energía.

La primera forma que sirvió al hombre para utilizar la energía solar térmica fue a través de la energía solar pasiva, es decir, aprovechando la energía que penetra por las ventanas y muros convenientemente orientados, durante los meses fríos, y favoreciendo las corrientes de aire por efecto térmico en los meses cálidos. En este tipo de construcciones, donde se aprovecha la energía solar pasiva, se usan los elementos estructurales del edificio para recoger, almacenar y distribuir la energía solar. A diferencia de la energía solar activa no se precisa de la instalación de ningún equipo mecánico sólo se requiere que la fachada sur del edificio permanezca soleada durante la estación cálida. La energía solar pasiva puede utilizar las tres formas de transmisión de calor existentes, conducción, convección y radiación, para distribuir este calor por todos los lugares habitables del edificio.

#### 2.1.1 Elementos para el aprovechamiento de la energía solar en un edificio

Los siguientes elementos que se describen a continuación constituyen y completan el diseño de un edificio basado en el aprovechamiento de este tipo de energía solar:

- Abertura (Colector)
- Absorbedor
- Masa térmica
- Distribución
- Control

#### ABERTURA (COLECTOR)

Superficie acristalada o ventanas por las que se recibe la luz del sol en el edificio. Normalmente esta superficie esta orientada a menos de 30° del verdadero sur – hemisferio norte - y los rayos solares que inciden sobre esta no deben estar obstaculizados por árboles o otras construcciones entre las 9 a.m. y las 3 p.m. durante la estación cálida.

#### ABSORVEDOR

Superficie de mayor absorbancia en los elementos de almacenamiento (muro, suelo, contenedor de agua,...) que se sitúa directamente en la trayectoria de los rayos del sol.

#### MASA TÉRMICA

Materiales que almacenan el calor producido por la luz del sol. La diferencia con el absorbedor, aunque en ocasiones estos elementos coinciden (muro, suelo), es que el absorbedor es una superficie expuesta a la luz solar mientras que la masa térmica es el material que existe tras esta superficie.

#### DISTRIBUCIÓN

Método por el que se hace circular el calor desde el colector y los puntos de almacenamiento a las diferentes zonas habitables del edificio. Un diseño estrictamente pasivo utilizara exclusivamente los tres modos de transmisión de calor – conducción, convección y radiación – pero en algunas aplicaciones se pueden usar ventiladores, conductos o ayudas semejantes para esta distribución.

#### CONTROL

Para controlar la radiación que llega al colector se pueden usar techos colgantes, sensores electrónicos de temperatura – termostato diferencial que controla un ventilador al que pone en funcionamiento ante una sobrettemperatura, por ejemplo - , respiraderos, persianas de baja emisividad, toldos y otros sistemas que puedan ayudar a tal fin.

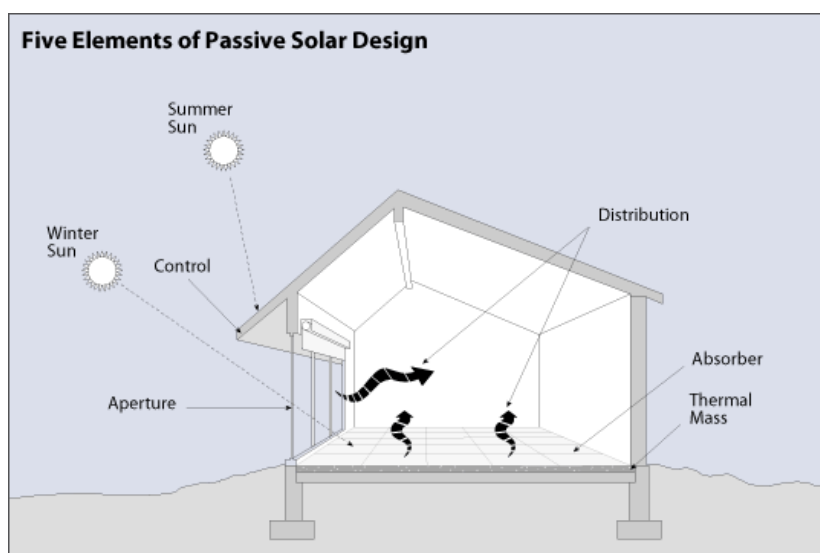


Figura 2.1. Elementos de un sistema de energía solar pasiva.

La disciplina conocida como *arquitectura bioclimática* se desarrolló para adaptar los principios de la energía solar pasiva a la construcción salvaguardando los niveles de confort exigidos en los edificios.

Podemos definir arquitectura bioclimática como aquella capaz de aprovechar la radiación solar en los meses fríos y rechazarla en los meses cálidos, que aprovecha la ventilación para

combatir la humedad y para evacuar el aire caliente molesto, y que emplea el aislamiento para reducir los intercambios térmicos con el exterior.

### 2.1.2 Tipos de sistemas bioclimáticos

Los elementos arquitectónicos bioclimáticos, también llamados sistemas climáticos especiales responden a la siguiente definición: componentes de un edificio, cuya misión principal es mejorar su comportamiento climático, actuando sobre los fenómenos de radiación, térmicos y del movimiento del aire, que actúan de forma natural en la arquitectura. También se llaman sistemas pasivos por el hecho de no utilizar ninguna fuente de energía artificial para su funcionamiento.

Se pueden diferenciar los tipos que se describen en los siguientes epígrafes.

#### SISTEMAS CAPTORES

Componentes o conjunto de componentes de un edificio que tienen como objetivo primordial captar la energía de la radiación solar y transferirla al interior en forma de calor. Son los *sistemas pasivos de energía solar*.

- Sistemas directos
- Sistemas semidirectos
- Sistemas indirectos
- Sistemas independientes

#### SISTEMAS DIRECTOS ('DIRECT GAIN')

La energía penetra directamente en el interior a través de superficies con vidrio (*ventanas*, lucernarios). Una vez dentro, la radiación solar es absorbida por las superficies interiores, calentándolas.

#### SISTEMAS SEMIDIRECTOS ('SUNROOMS')

En estos sistemas, se interpone un espacio entre el interior y el exterior (*invernadero*), que tiene una gran entrada de radiación, y que por tanto, alcanzará condiciones térmicas medias más altas que las del exterior. Este espacio puede ser temporalmente habitable, actuando como una prolongación del interior.

#### SISTEMAS INDIRECTOS ('INDIRECT GAIN')

La captación de radiación solar se realiza a través de un elemento de almacenamiento con una posterior transferencia de energía al interior. La energía radiante, después de atravesar el vidrio, es absorbida en forma de calor en un elemento de gran capacidad térmica. Desde este elemento se cede al interior en forma de radiación de onda larga y de convección, con un retardo y una importante reducción en la oscilación de temperatura.

#### SISTEMA INDIRECTO POR FACHADAS

Tiene una superficie de acumulación vertical, protegida por un vidrio y acabada en color oscuro o con superficie selectiva cálida. El *muro invernadero o de inercia* está construido de obra (ladrillo, hormigón, piedra) con un grosor de 30 a 40 cm para retardar unas 12 horas el máximo aporte de energía. El calor pasa a través del muro y se cede al interior por radiación de onda larga y convección. *El muro 'Trombe'* es un caso particular del anterior, al que se añaden aberturas superiores e inferiores en el muro (para comunicar el sistema con la habitación contigua) y se coloca delante una pared de cristal que recibe la radiación solar. Gracias a esto, se aumenta (y se controla) la cesión de calor por termocirculación en el circuito de aire resultante. *El muro de agua* está formado por contenedores de agua donde se acumula la energía, que es cedida al interior por radiación y convección.

#### SISTEMA INDIRECTO POR TECHOS

Utiliza una masa acumuladora importante en la cubierta del edificio. En invierno capta la radiación, se calienta y la transfiere al interior como radiación de onda larga. En verano puede servir como refrigeración, al enfriarse por la noche por emisión de onda larga hacia el cielo. El caso más típico es la *cubierta de agua o cubierta estanque*. (Relacionado con la cubierta hídrico-solar).

#### SISTEMA INDIRECTO POR SUELOS

La energía se capta y almacena en un depósito situado debajo del suelo del interior. El aporte radiante se hace por un lateral del acumulador orientado al sol.

#### SISTEMAS INDEPENDIENTES

Utilizan sistemas similares a los del sistema indirecto por el suelo, pero en este caso los componentes o elementos captadores y acumuladores se pueden independizar entre sí y con el espacio acondicionado. La transferencia de calor entre los distintos elementos se realiza por medio de flujos convectivos de aire (o de agua) que circula por conductos, donde se incorporan dispositivos de regulación y control.

#### SISTEMAS DE INERCIA

Partes o componentes de un edificio que actúan como estabilizadores de las temperaturas interiores, frente a las oscilaciones de las condiciones exteriores. Su principio de funcionamiento las hace adecuadas para mejorar tanto los efectos del frío o del calor. Se caracterizan por su masa térmica útil, entendiendo ésta como la capacidad calorífica que proporciona el edificio para ciclos de una duración determinada.

#### SISTEMAS DE VENTILACIÓN Y TRATAMIENTO DEL AIRE

Componentes de un edificio que tienen como función primordial facilitar la circulación del aire a través suyo, y/o tratarlo para mejorar sus condiciones de temperatura y humedad. Aunque pueden analizarse como sistemas individuales, en muchos casos dos o más sistemas diferentes (de impulsión y extracción de aire, o de tratamiento del aire asociado con uno de impulsión) pueden trabajar de forma conjunta, favoreciéndose mutuamente.

#### SISTEMAS GENERADORES DEL MOVIMIENTO DEL AIRE

Generan movimiento de aire en el interior del edificio, favoreciendo la entrada y/o la salida por aberturas o dispositivos colocados a tal fin.

#### VENTILACIÓN CRUZADA

Sistema de ventilación de un espacio o sucesión de espacios asociados, mediante aberturas situadas en dos fachadas opuestas.

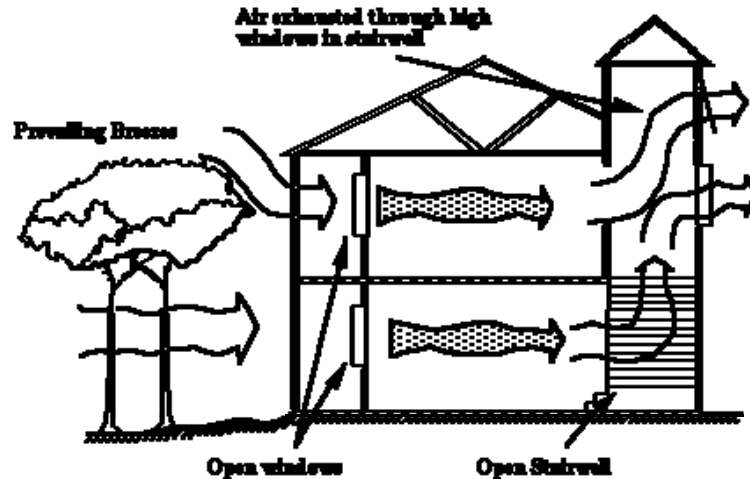


Figura 2.2. Sistema de ventilación cruzada.

#### EFECTO CHIMENEA

Sistema que genera una extracción de aire al situar aberturas en la parte superior de un espacio, que pueden estar conectadas con un conducto de extracción vertical.

CÁMARA O CHIMENEA SOLAR ('THERMOSYPHON COLLECTOR', 'HEAT SYPHON', OR 'GLAZED SOLAR CHIMNEY')

Es un dispositivo que utiliza la energía de la radiación solar para la extracción del aire. Su misión consiste en calentar el aire dentro de una cámara, mediante un captador de superficie oscura protegido por una cubierta de vidrio. Al calentarse el aire y disminuir su densidad, se produce un efecto de succión en las perforaciones situadas en la parte baja de la cámara, en contacto con el interior, y una salida de aire por la parte superior. Algunos sistemas captadores, como el *muro Trombe*, pueden utilizarse en verano como generadores de ventilación, abriendo al exterior la parte superior de la cámara y al interior la inferior.

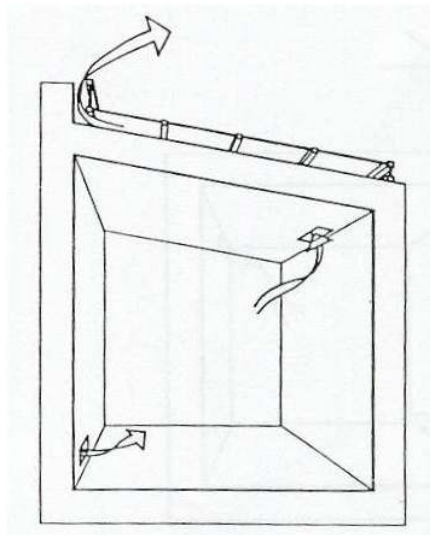


Figura 2.3. Ejemplo de chimenea solar.

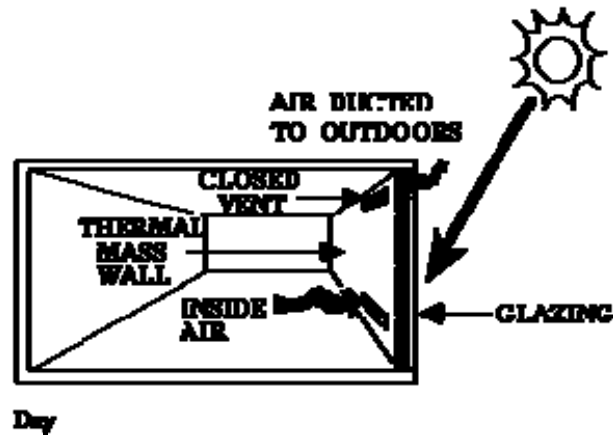


Figura 2.4. Muro Trombe adaptado para funcionamiento como chimenea solar.

#### ASPIRACIÓN ESTÁTICA

Sistemas que producen una depresión en el interior del edificio, mediante el efecto Venturi, generado por el viento sobre un dispositivo adecuado, situado en la cubierta del edificio. La extracción se debe completar con una entrada de aire por la parte inferior.

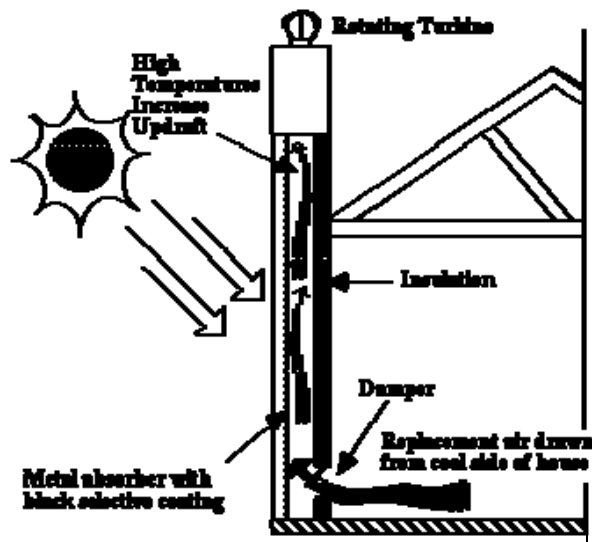


Figura 2.5. Ejemplo de aspiración estática.

#### TORRE DE VIENTO

Sistema de introducción de aire en un edificio, a través de una torre que recoge el viento a cierta altura sobre la cubierta, donde éste es más intenso. El aire se lleva por un conducto que puede introducirlo por la parte baja de los locales e incluso incorporar dispositivos de tratamiento de aire.

#### TORRE EVAPORATIVA

Consiste en un sistema de tratamiento que además produce una cierta impulsión de aire hacia el interior. El aire que penetra por la parte superior de una torre es enfriado por evaporación del agua, que humedece las superficies del interior de la misma. Este aire enfriado y más pesado, tiende a caer penetrando en el interior desde la parte baja de la torre.

#### SISTEMA DE VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA

Aprovecha la inercia térmica del terreno para suministrar aire frío, en períodos cálidos, mediante un sistema de conductos de aire subterráneos, por donde pasa el aire exterior para ser enfriado antes de introducirse en el edificio.

#### SISTEMAS DE PROTECCIÓN A LA RADIACIÓN

Constituidos por aquellos componentes que tienen como misión proteger de radiaciones no deseadas en períodos cálidos a los edificios o espacios exteriores anexos.

Una vez aclarados algunos conceptos básicos sobre arquitectura bioclimática nos adentramos en una descripción algo más detallada de los sistemas pasivos pared Trombe y chimenea solar, el último de los cuales centrará el contenido de la investigación llevada a cabo en este proyecto.

## 2.2 Pared Trombe

La pared Trombe es un sistema creado en Francia en el año 1957 por Felix Trombe y Jacques Michel agrupado dentro de los sistemas indirectos en arquitectura bioclimática como se indicó anteriormente. En 1967 se construye un prototipo de casa con paredes 'Trombe' en Odeillo (Francia). Los resultados de este estudio fueron publicados en el trabajo de referencia de Robert et al. (J.F. Robert, J.L. Peube y F. Trombe, "Experimental Study of Passive Air-Cooled Flat-Plate Solar Collectors: Characteristics and Working Balance in the Odeillo Solar Houses", *Energy Conversion in Heating and Cooling and Ventilation Buildings*, Hemisphere, Washington, Vol. 2, pp. 761-782, 1978).

En una pared Trombe la radiación solar tras atravesar un vidrio (solo o doble) es absorbida y acumulada en forma de calor por un elemento de gran capacidad térmica, también llamado elemento confinador, que en este caso puede ser un muro de hormigón, ladrillo o piedra (normalmente entre 20 y 40 cm de grosor). El vidrio y el elemento confinador se sitúan a una distancia de entre 20 y 150 cm para generar un espacio pequeño o cámara de aire evitando así los efectos conductivos. Este elemento confinador o muro tiene unas perforaciones superiores e inferiores que comunican con el espacio a climatizar, dando lugar a una circulación del aire (termocirculación) tal como se muestra en las figuras 2.6 y 2.7.

Este sistema pasivo de recolección de energía solar de forma indirecta utiliza transferencia de calor ya sea por conducción, convección y/o radiación, el principio de funcionamiento se puede observar en las ilustraciones.

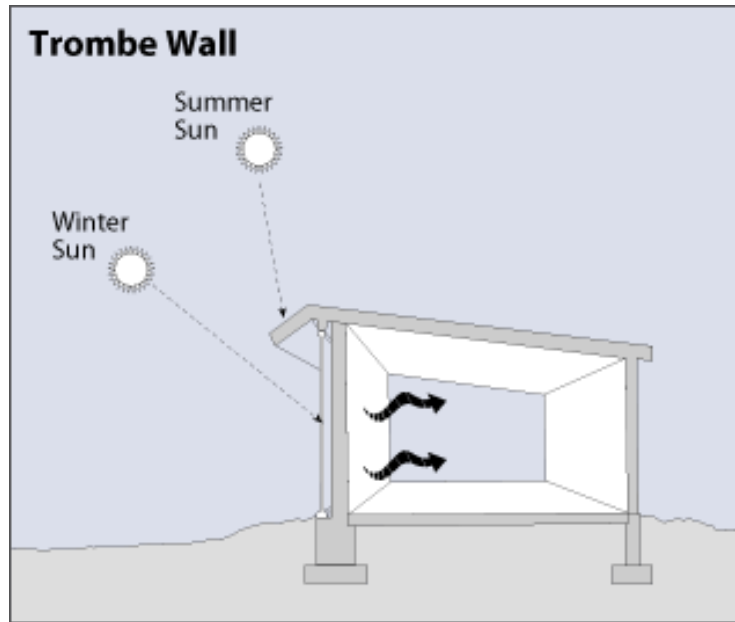


Figura 2.6. Pared o muro Trombe.

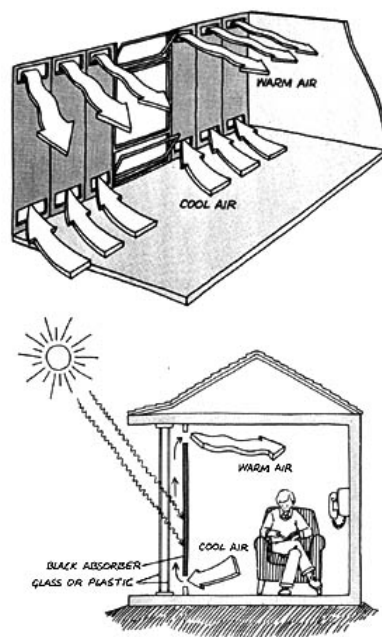


Figura 2.7. Termocirculación en una pared Trombe.

La radiación solar pasa a través del vidrio y calienta el muro, el cual irá calentando el aire atrapado en la cámara por convección natural. El aire caliente, más ligero se elevará en la cámara de aire y penetrará en el local a climatizar a través de la rejilla superior.

Para el obligatorio cumplimiento de la ecuación de conservación de la masa se adsorberá aire frío procedente del local por la rejilla inferior dando lugar a la termocirculación antes mencionada.

De forma adicional se puede colocar una película oscura sobre la pared en el exterior para absorber parte del espectro solar visible y emitir una pequeña proporción del rango infrarrojo. Esta absorción transforma la luz en calor en la superficie de la pared y disminuye la reflexión.



También es recomendable que el vidrio tenga un componente aislante adicional para que en la noche el calor ganado no se disipe.

Las rejillas antes señaladas suelen presentar trampillas manuales o automáticas que evitan la termocirculación invertida de noche, lo que también se puede conseguir prolongando la cámara exterior por debajo del nivel del pavimento interior y situando los orificios del muro a este nivel. Un ejemplo real de pared Trombe se puede ver en la figura 2.8.



Figura 2.8. Ejemplo real de pared Trombe.

Para un buen dimensionamiento de la pared Trombe se han de tener en cuenta factores externos e internos, entre los externos cabe destacar:

1.- El clima: Las pérdidas de calor dependen de la diferencia de temperaturas externa e interna del cuarto. Cuanto mayor sea esta diferencia mayores serán las pérdidas por lo que en climas muy fríos se deberá sobredimensionar el muro.

2.- Latitud y orientación: La energía solar incidente sobre la fachada sur en invierno en latitudes por encima del ecuador y sobre la fachada norte en latitudes por debajo del ecuador, cambia según la latitud, por ello se suele incrementar el tamaño del muro a medida que aumenta la latitud por recibir este menos calor. También se ha de tener en cuenta la trayectoria del sol durante las diferentes épocas del año.

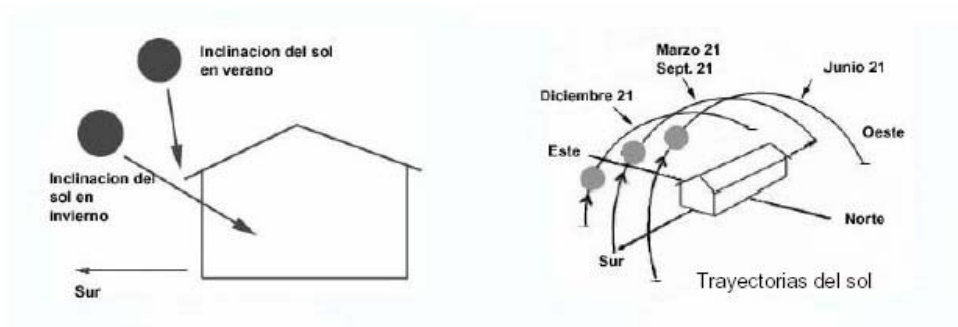


Figura 2.9. Inclinación y trayectorias del sol.

La orientación óptima, en el hemisferio norte, es a 5° del verdadero sur. A 15° funciona bien pero produce sobrecalentamientos en verano, a 30° empieza a no ser tan efectivo. En el hemisferio sur debe ser al contrario, el muro debe estar ubicado hacia el norte.

### 3.- Necesidades de calefacción (pérdidas de calor).

La eficiencia de la pared Trombe también dependerá de los factores internos: el muro (espesor y material), la superficie de vidrio, el número y dimensiones de los orificios.

## 2.3 Chimenea solar

En arquitectura bioclimática, como ya se mencionó, las chimeneas solares se agrupan dentro de los sistemas de ventilación y tratamiento del aire que tienen como misión principal facilitar la circulación del aire a través suyo, y/o tratarlo para mejorar sus condiciones de temperatura y humedad.

En este sistema se utiliza la energía de la radiación solar para la extracción del aire. Al igual que la pared Trombe dispone de un vidrio y un captador de superficie oscura (muro de hormigón, ladrillo o piedra en pared Trombe) entre los que se sitúa una cámara de aire, su funcionamiento también se basa en los principios de la convección natural y se ayuda del efecto de succión en las perforaciones situadas en la parte baja que comunica con el local a climatizar, el aire caliente escapa por las perforaciones superiores de la cámara.

De forma idéntica al sistema anterior las cámaras solares se orientan hacia la máxima intensidad de radiación solar.

Como podemos observar es un dispositivo muy parecido al muro Trombe con la diferencia de que el aire caliente se expulsa a la atmósfera y requiere de una renovación de aire en el local climatizado.

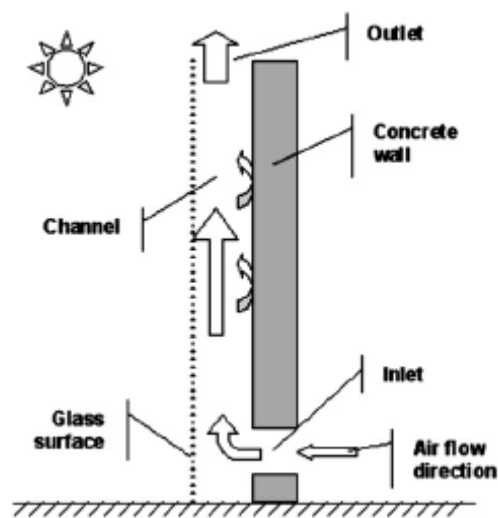


Figura 2.10. Esquema de funcionamiento de una chimenea solar.

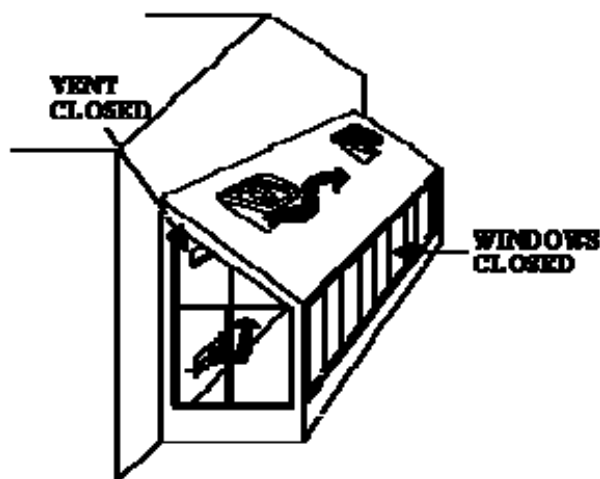


Figura 2.11. Habitación acristalada funcionando como chimenea solar.

## 2.4 Motor solar

Otra aplicación interesante de este tipo de sistemas de energía solar pasiva se encuentra en la generación de energía, aplicación que tiene su origen hace más de un siglo y que ha sido objeto de múltiples investigaciones así como del desarrollo de diversos prototipos.

El origen de esta aplicación se encuentra en un artículo publicado el 25 de Agosto de 1903 en la revista *La Energía Eléctrica*, subtitulada *Revista General de Electricidad y sus Aplicaciones*. En este artículo el coronel de artillería Isidoro Cabanyes presentaba su denominado "*Proyecto de motor solar*", donde proponía un nuevo ingenio para el aprovechamiento de la energía solar consistente en una chimenea con dos peculiaridades en su base: un colector solar para calentar el aire y así provocar una corriente ascendente por la chimenea y un generador eólico concebido para aprovechar el impulso de dicha corriente de aire.

En este artículo aparecían detalles constructivos del motor, así como sus ventajas de mantenimiento, seguridad y la ausencia de personal de servicio, promovía su uso para carga de baterías y ofrecía un conjunto de fórmulas para el cálculo del trabajo obtenido. Un ejemplo encontrado en esta publicación tenía como datos de partida 65 CV de potencia y 75 Kgm de par, dando las fórmulas ofrecidas un resultado de 63.87 m de altura de chimenea, aunque para el militar español estas alturas no suponían ningún problema constructivo. Este "*Motor solar*" nunca fue llevado a la práctica.

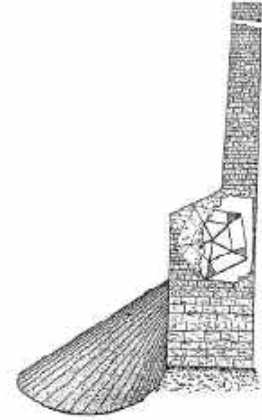


Figura 2.12. Encabezamiento del artículo de Isidoro Cabanyes, y su propuesta de energía solar.

En el año 1981 el ministerio alemán de investigación y tecnología (BMFT) con la colaboración de la compañía eléctrica española Unión Fenosa, promovió y financió la construcción de una máquina basada en este mismo principio en la localidad española de Manzanares. La chimenea tenía 190m de altura y el colector solar era un invernadero de 240 m de diámetro, de forma aproximadamente redonda, construido a base de cuadrados de 6m de lado. En los nodos de la red existían columnas que elevaban dicho invernadero 2 m sobre el suelo. En la base de la chimenea se instaló un generador eólico de 50KW de potencia. Una vista aérea de esta central eólico-solar se muestra en la figura 2.13.

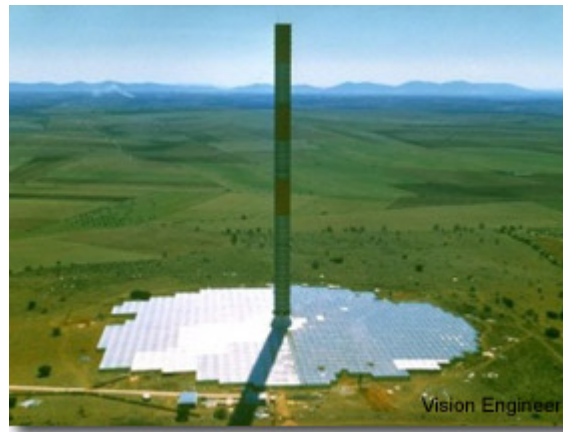


Figura 13. Vista aérea de la chimenea solar de Manzanares.

También podemos ver la superficie exterior del colector en las cercanías a la chimenea, así como el interior de este (figuras 2.14 y 2.15).





Figura 2.14. Superficie del colector en las cercanías a la chimenea (Manzanares).



Figura 2.15. Interior del colector solar (Manzanares).

En ninguna de las referencias ofrecidas por los creadores de esta central mencionan al militar español por lo que suponemos que desconocían su artículo. Cuando se construyó la chimenea hubo defectos de instalación de una de las riostras que aseguraban su estabilidad y la chimenea terminó por derrumbarse durante una tormenta en el año 1989.

Esta central sólo era un prototipo para una mucho más ambiciosa de 1000 m de altura (al igual que para Cabanyes la altura no se barajaron los problemas ligados a construcciones de tales dimensiones) y 170 m de diámetro que arrojaría una potencia de 200MW.

Hoy podemos encontrar el anuncio de inauguración de una central de semejantes características en Mildura (Australia) para el año 2008.



Figura 2.16. Vista aérea de la futura central de Mildura (Australia).

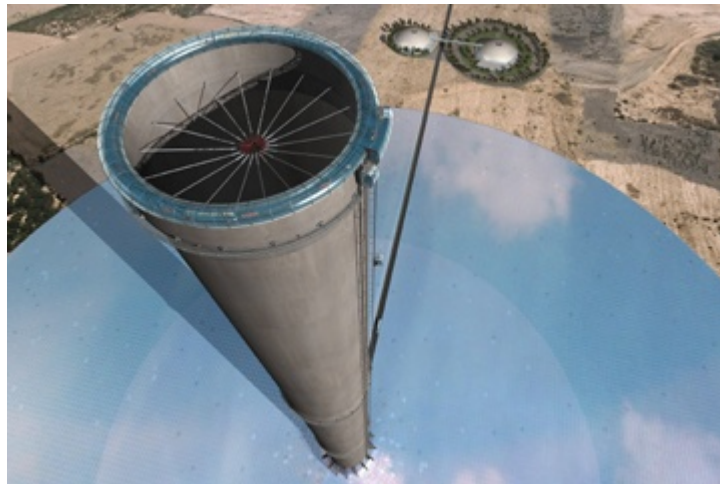


Figura 2.17. Vista superior de la chimenea, Mildura (Australia).

Esta central tendría un colector solar de 3.5 Km de diámetro ( $10 \text{ Km}^2$  de superficie) y está promovida por EnviroMission and SolarMission Technologies (USA). Esta central extraería el 2% de la energía solar disponible en la zona ( $1 \text{ KW/m}^2$ ).

En la figura 2.18 podemos observar en forma esquemática el funcionamiento de este tipo de centrales que siguen las directrices trazadas por Isidoro Cabanyes hace más de un siglo

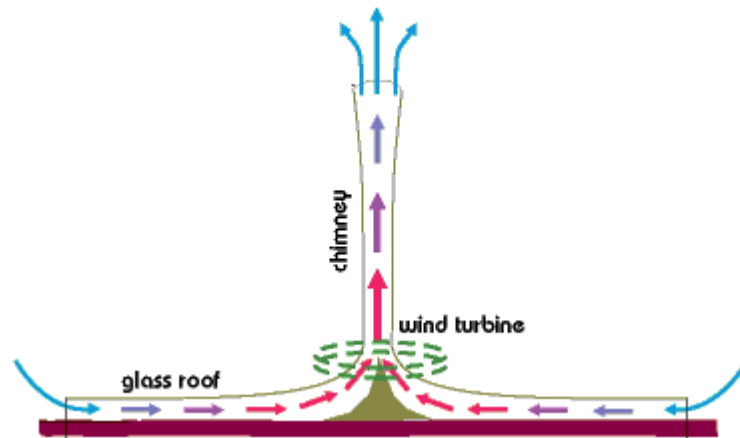


Figura 2.18. Esquema de funcionamiento de una central basada en una chimenea solar.

En el caso siguiente se ha dotado a la central de unos depósitos de agua, situados en el piso del colector, para acumular calor durante el día y conseguir el funcionamiento ininterrumpido de la central durante toda la jornada.

El funcionamiento diurno se puede apreciar en la figura 2.19.

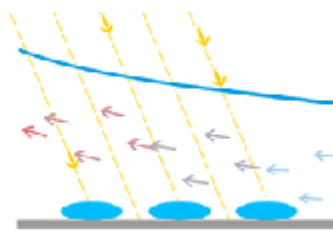


Figura 2.19. Funcionamiento diurno.

La radiación solar calienta el aire y los depósitos de agua, el aire asciende por convección natural. El funcionamiento nocturno se muestra en la figura 20.

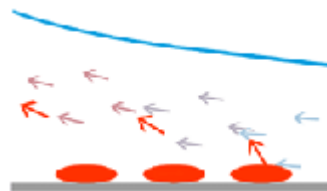


Figura 2.20. Funcionamiento nocturno.

Durante la noche los depósitos disiparían calor y el aire seguiría calentándose sin interrumpir la termocirculación diurna.

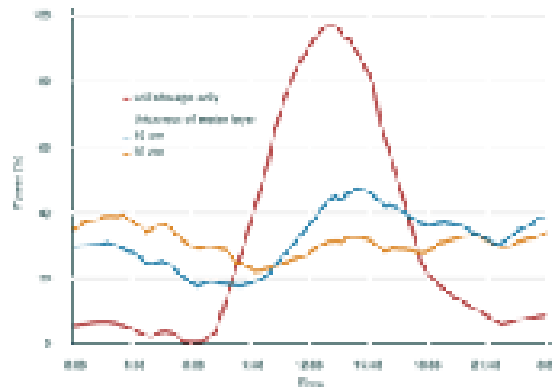


Figura 2.21. Gráfico de energía producida.

En el gráfico de la figura 21 se muestra la energía eléctrica obtenida de una chimenea solar durante las 24 horas del día cuyo colector solar tiene la tierra como suelo (línea roja), un depósito de agua de 10cm de espesor (línea azul) y de 20cm de espesor (línea amarilla), como se observa en estos últimos casos se consigue un funcionamiento continuo de la central.

Los más optimistas defienden que una central de este tipo con una superficie de colector de 7000 m de diámetro, construida y explotada en una zona con una radiación anual de 2300 KWh/m<sup>2</sup> puede producir entre 700 y 800 GWh al año, por lo que con un pequeño número de estas centrales se podría reemplazar a una central nuclear. En la figura 22 se presenta como sería una de estas hipotéticas y colosales instalaciones.

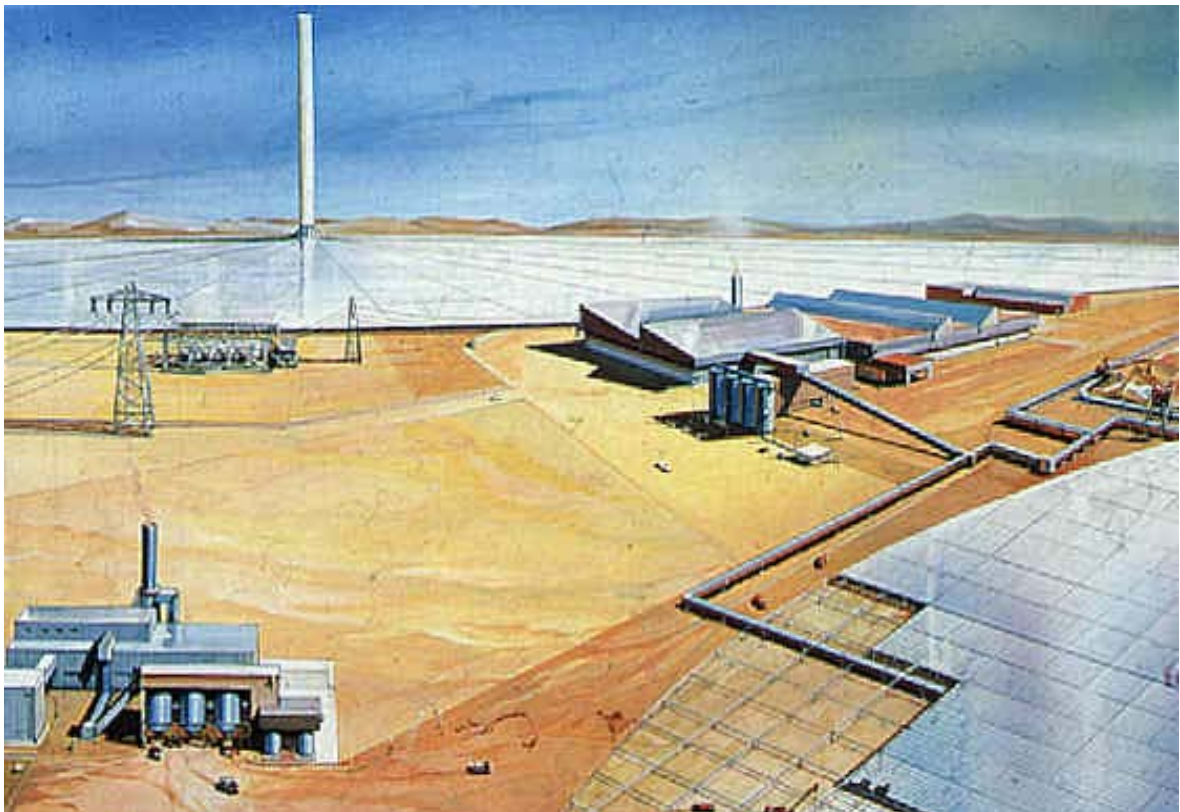


Figura 2.22. Central hipotética de gran potencia basada en una chimenea solar.