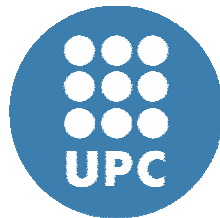


ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUNYA
ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE BARCELONA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTONICAS I



Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona
School of Architecture of Barcelona



**HACIA UN RASCACIELOS ECOEFICIENTE. ESTUDIO SOBRE LA
SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL DEL EDIFICIO EN ALTURA Y SU
APLICACIÓN EN BARCELONA Y MADRID.**

TESIS DOCTORAL

AUTOR

ENRIQUE CARRERAS RUFIN

ARQUITECTO

DIRECTOR DE LA TESIS

FERNANDO JUAN RAMOS GALINO

DOCTOR ARQUITECTO

2012

CAPÍTULO 5. HACIA UN RASCACIELOS ECOEFICIENTE.

MECANISMOS DE AHORRO ENERGÉTICO EN LA EDIFICACIÓN

APLICABLES AL RASCACIELOS.



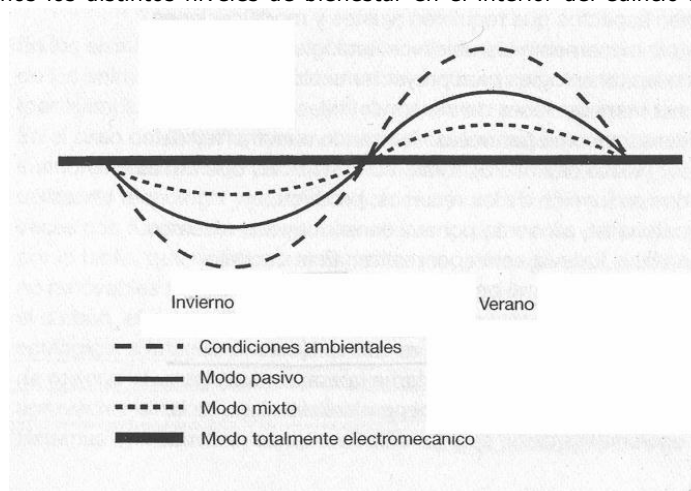
- 5 MECANISMOS DE AHORRO ENERGÉTICO APLICABLES AL EDIFICIO EN ALTURA:
 - 5.1 SISTEMAS PASIVOS.
 - 5.1.1 ORIENTACIÓN
 - 5.1.2 FORMA Y CONFIGURACIÓN GENERAL
 - 5.1.3 CONFIGURACIÓN DE LA PIEL
 - 5.1.4 SISTEMAS DE CONTROL AMBIENTAL (CLIMATIZACIÓN E ILUMINACIÓN NATURAL)
 - 5.2 SISTEMAS MIXTOS.
 - 5.3 SISTEMAS ACTIVOS.
 - 5.4 SISTEMAS PRODUCTIVOS.

5. MECANISMOS DE AHORRO ENERGÉTICO APLICABLES AL EDIFICIO EN ALTURA.

En este capítulo el objetivo que se persigue es recoger los principales mecanismos de que dispone actualmente un edificio para ser ecoeficiente. Existen cuatro sistemas principales que permiten al rascacielos el ahorro de energía. Están ordenados por el orden de prioridad con el que deben ser empleados según Ken Yeang:

- Sistemas pasivos de uso de energía y reciclaje: Son aquellos en los que no interviene ningún dispositivo o aparato electromecánico. Aprovechan la propia morfología del edificio y las energías ambientales propias del lugar. Los sistemas pasivos emplean técnicas blandas "low tech" de refrigeración y/o calefacción para modificar la temperatura interior mediante fuentes energéticas naturales y ambientales.
- Sistemas mixtos: Son aquellos que están asistidos parcialmente tanto por medios electromecánicos como por las energías ambientales del lugar. Dependen parcialmente de energía artificial.
- Sistemas activos: Son sistemas completamente artificiales de iluminación, calefacción y aire acondicionado, totalmente dependientes de la energía artificial. Una inteligente y responsable utilización de estos sistemas puede permitir una reducción en el impacto ambiental respecto a la derivada de la utilización convencional que estos sistemas implican.
- Sistemas productivos: Son sistemas que captan y/o generan energía in situ, como por ejemplo, las células fotovoltaicas. Proporcionan una fuente de energía limpia, silenciosa y, en principio, exenta de contaminación.

En el gráfico ¹ siguiente vemos los distintos niveles de bienestar en el interior del edificio según los sistemas utilizados.



¹ Yeang, Ken. *El rascacielos ecológico*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2001, p. 199.

Como vemos en el anterior gráfico, no es posible alcanzar las condiciones higrotérmicas de bienestar únicamente mediante sistemas pasivos; es necesario combinar distintos sistemas para llegar a alcanzar ese grado de confort térmico. De los cuatro sistemas de ahorro energético del edificio, hay que dar prioridad a los pasivos, ya que son los que requieren menos consumo de energía de fuentes no renovables. Una vez investigadas todas las posibles estrategias pasivas es cuando se puede pasar a estudiar los distintos sistemas mixtos a emplear. A continuación, cuando se hayan explotado al máximo todos los sistemas pasivos y mixtos, es cuando procede aplicar los sistemas activos, ya que, de los cuatro, son los que más energía consumen a lo largo de la vida útil de edificio en altura.

Finalmente, los sistemas productivos, a pesar de proporcionar una fuente de energía totalmente limpia, quedan al margen de esta clasificación de prioridades en la elección del sistema, ya que su instalación depende fundamentalmente de la viabilidad económica del proyecto, dado su alto coste de instalación. De todos modos, deben instalarse siempre que sea económicamente posible, por su alto rendimiento a medio y largo plazo

Estos cuatro sistemas van en la misma dirección que establecen las directrices de la Carta Europea de la energía solar en la arquitectura y el urbanismo, cuando menciona que *“los edificios y espacios exteriores anexos deben concebirse de tal forma que se reduzcan al mínimo posible la cantidad de energía consumida en la iluminación, en la obtención de calor para calefacción y agua caliente, en la refrigeración y ventilación y en el aprovechamiento de energía fotovoltaica. El resto de necesidades se cubrirá mediante soluciones que, según los criterios dictados por un balance energético general, estén de acuerdo con el nivel más avanzado de la técnica en cuanto al uso de energías de bajo impacto ambiental.”*²

² Herzog, Thomas et Al. *Carta europea de la energía solar en la arquitectura y el urbanismo*. Ed. Prestel Verlag, Munich, Berlin, London, New York, 2007, p. 64.

5.1 SISTEMAS PASIVOS DE AHORRO ENERGÉTICO APLICABLES AL EDIFICIO EN ALTURA.

Tal y como hemos comentado anteriormente, los sistemas pasivos de ahorro energético son aquellos en los que no interviene ningún dispositivo o aparato electromecánico. Aprovechan la propia morfología del edificio y las energías ambientales del lugar. Emplean técnicas blandas “*low tech*” de refrigeración y/o calefacción para modificar la temperatura interior del edificio mediante fuentes energéticas naturales y ambientales.

En climas como los de Barcelona y Madrid, aplicando los sistemas pasivos, es posible rebajar los valores de la temperatura exterior en verano y aumentar la temperatura interior en invierno. Los sistemas pasivos con mayor repercusión energética son:

- 5.1.1 ORIENTACIÓN
- 5.1.2 FORMA Y CONFIGURACIÓN GENERAL
- 5.1.3 CONFIGURACIÓN DE LA PIEL
- 5.1.4 SISTEMAS DE CONTROL AMBIENTAL (CLIMATIZACIÓN E ILUMINACIÓN NATURAL)

5.1.1 ORIENTACIÓN:

La orientación en un edificio es el primer mecanismo pasivo para el ahorro en el consumo de energía en calefacción, refrigeración e iluminación a lo largo de su vida útil.

Existen numerosos precedentes históricos en el tratamiento de la orientación como mecanismo de ahorro energético:

*Los constructores egipcios y de la antigüedad clásica, ya entonces, eran muy conscientes de la importancia de la orientación solar, tanto por razones de salud como por motivos religiosos. Según algunos estudiosos como Joseph N. Lockyer, los templos solares egipcios, como el de Amón-Ra en Karnak, estaban orientados de manera que en el orto y el ocaso del día más largo del año (solsticio de verano) un rayo de sol atravesara un pasadizo que comunicaba con el interior del santuario. Un destello de luz que atravesase un pasadizo estrecho de 500 yardas hasta un santuario orientado apropiadamente no se mantiene más de un par de minutos, desapareciendo posteriormente. De esta forma, los sacerdotes podían determinar la duración del año con la precisión del minuto, llegando a conocer hasta su diezmilésima parte: 365,2422. Era un instrumento científico de muy alta precisión, pues con él los sacerdotes podían determinar la duración del año con una exactitud considerable.

*El “cardo” o eje de los campamentos romanos, en la búsqueda de la mejor orientación posible no se desviaba más de 30º del sur.

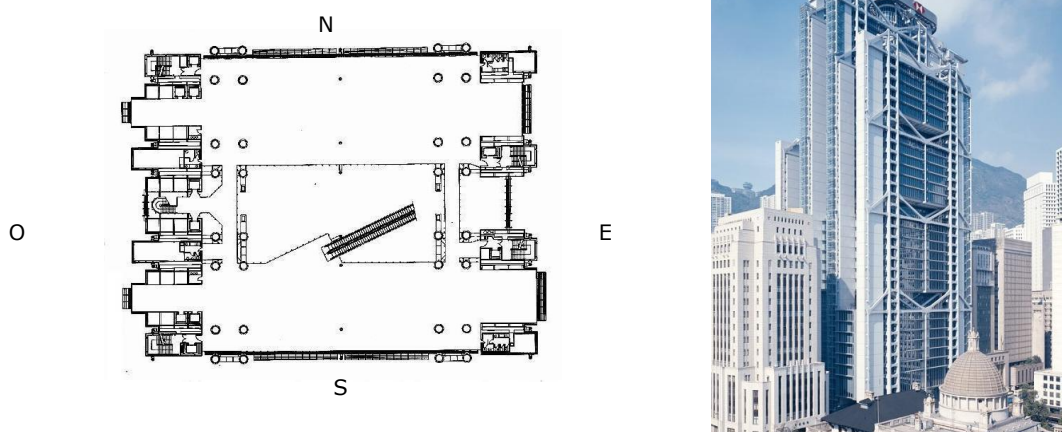
*Vitruvio estaba también muy interesado en la calidad y regularidad del asoleo. En su tratado *De Architectura* ³, el autor reconoce el emplazamiento salubre como el principal atributo de una ciudad, y proporciona diversas reglas para una correcta distribución. Entre sus preceptos destaca uno que afirma que “*si se orientan hacia el mediodía o hacia occidente no serán salubres porque durante el verano la sección meridional del cielo se calienta al amanecer y arde al mediodía; de la misma forma, aquellas que miran hacia occidente se calientan al mediodía y arden por la tarde. Además, en estos lugares, los elementos se deterioran, debido a la continua alternancia de calor y frío*”.

En el caso del rascacielos, el ahorro en el consumo de energía en calefacción, refrigeración e iluminación es especialmente importante, dada la exposición a la que se encuentra sometido el mismo. De hecho, según Ken Yeang ⁴, en los rascacielos modernos de oficinas, la luz artificial es responsable de hasta el 50% de los costes totales de electricidad.

De la misma forma que las estaciones se encuentran muy diferenciadas por la inclinación del eje terrestre, la orientación de un edificio determina la cantidad de radiación que incide en los distintos lados en diferentes momentos.

Según Víctor Olgyay ⁵, durante el invierno, un área expuesta a sur y a 40º de latitud recibe aproximadamente tres veces más energía solar que las expuestas a este y oeste; en verano, la radiación que incide en los lados norte y sur es solamente la mitad de la que incide en las fachadas este y oeste. En latitudes más bajas estos índices son aún más pronunciados y pueden significar fácilmente la diferencia entre confort e inestabilidad.

Fig. 3: Planta y vista del rascacielos Hong Kong & Shanghai Bank (1985, altura 179 m.) de Norman Foster Ejemplo de rascacielos con las fachadas acristaladas dirigidas hacia la orientación climática óptima: norte-sur.



³ Vitruvius, *On Architecture*, traducido por Frank Granger, William Heineman, Londres, 1931.

⁴ Yeang, Ken. *El rascacielos ecológico*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2001, p. 213.

⁵ Olgyay, Victor. *Arquitectura y Clima*, Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1998, p. 53.

Ken Yeang presenta un diagrama ⁶ donde se ilustra la orientación óptima del rascacielos y la colocación de las fachadas principales según el clima en el que se encuentre el edificio (Fig. 1) así como las orientaciones en las que se producen las máximas ganancias caloríficas ⁷ (Fig. 2):

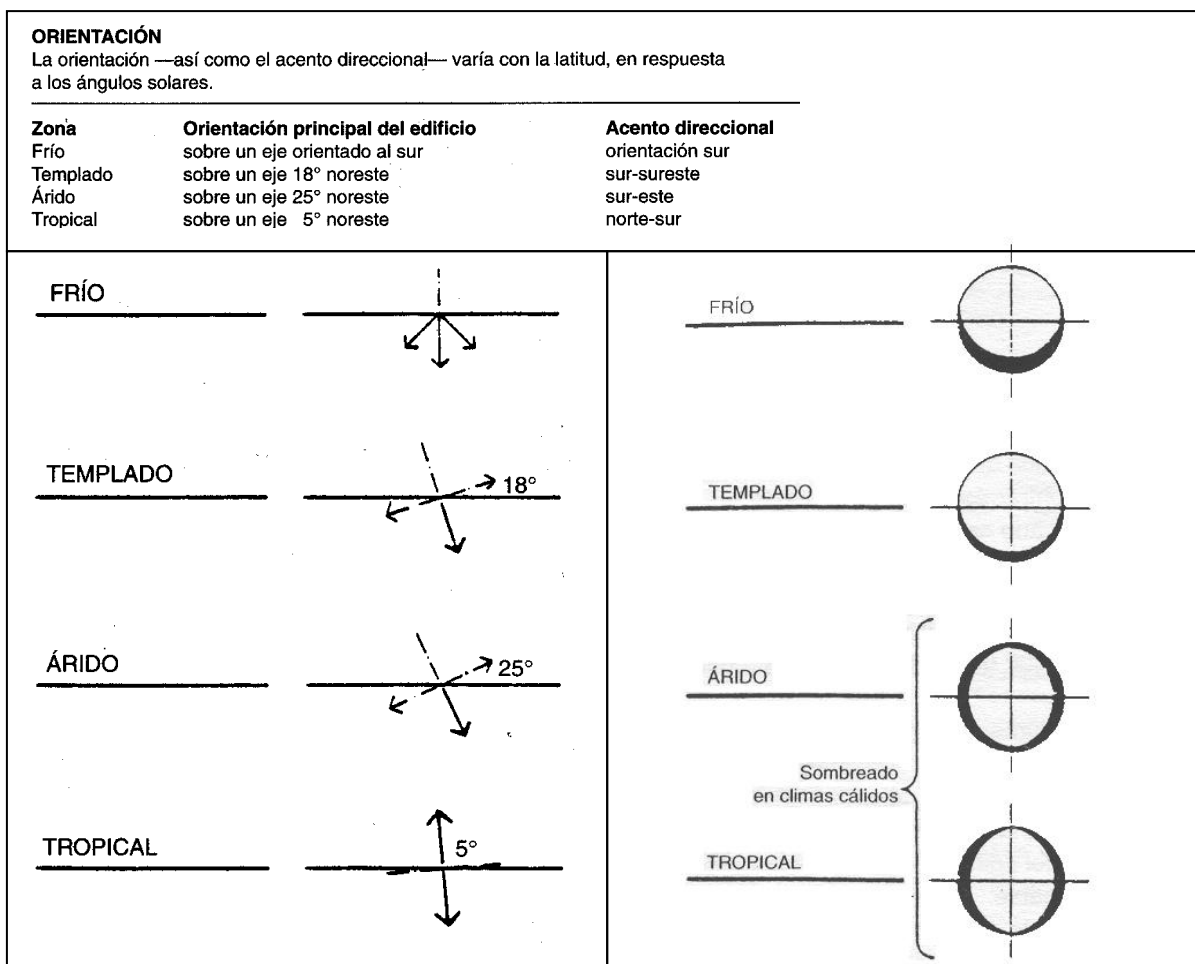


Fig. 1

Fig. 2

Teniendo en cuenta los diagramas de Yeang, y partiendo del hecho de que en climas templados como los nuestros, el diseño del edificio debe realizarse con vistas a introducir el sol en invierno para calentar e iluminar los espacios interiores y protegerse de él en verano, evitando así el sobrecalentamiento de los mismos; los rascacielos situados en Madrid y Barcelona, deben buscar la orientación óptima, que es la sur-sureste, sin olvidarse de las necesarias protecciones del sol en verano.

⁶ Yeang, Ken. *El rascacielos ecológico*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2001, p. 209.

⁷ Yeang, Ken. *Bioclimatic Skyscrapers*. Ellipsis, London Ltd, Londres, 1994, p. 145.

5.1.2 FORMA Y CONFIGURACIÓN GENERAL:

Para conseguir una respuesta pasiva del edificio es preciso configurar su forma en función de las energías del medio ambiente y las condiciones climáticas del lugar.

La configuración de la forma construida y su disposición en planta, la orientación, la relación entre su volumen y su superficie ⁸ y el uso de elementos amortiguadores como los núcleos de servicios, son variables que pueden tener efectos importantes en la conservación de la energía y en la iluminación natural de los espacios. Analicemos las diferentes variables y sus efectos sobre el edificio:

- Factor de forma: El factor de forma es la relación entre la superficie de la envolvente del edificio y su volumen. El factor de forma es uno de los factores más importantes e influyentes en el consumo energético de un edificio, ya que incide sobre las variables que más consumo energético requieren, como son la iluminación, climatización y cantidad de materiales de construcción del edificio.

Los edificios con un factor de forma alto son fáciles de iluminar naturalmente, dado que tienen mucha superficie de fachada. Sin embargo, climáticamente están más expuestos al exterior con el consiguiente mayor gasto energético de refrigeración en verano y de calefacción en invierno. En climas como los de Barcelona y Madrid, el factor de forma no conviene que sea demasiado alto, ya que conllevaría un mayor gasto energético de calefacción y refrigeración.

La reducción de la relación superficie/volumen y el diseño del edificio con una forma de edificio compacta, permiten además de reducir al máximo las pérdidas térmicas en invierno, disminuir la cantidad de materiales empleados en su construcción y el mantenimiento de los mismos, con los beneficios económicos, ambientales, energéticos y de emisiones que de ello se derivan.

Desde un punto de vista geométrico, la esfera representa la forma ideal de compacidad, ya que es la que tiene mayor superficie con el menor volumen. En términos de estructura ortogonal, el modelo ideal de compacidad lo representa el cubo. Según Guillermo Yáñez ⁹, la forma óptima para climas extremos como el cálido seco o el frío es la más compacta posible. Sin embargo, en climas cálidos secos y húmedos, el factor de forma debe

⁸ Daniels, Klaus. "Klima und Gebäudeform", en *Technologie des Ökologischen Bauens*, Birkhäuser, Berlín, 1995, p. 18-33.

⁹ Yáñez, Guillermo. *Arquitectura solar e iluminación natural*. Ed. Munilla-Lería, Madrid, 2008, p. 186.

ser mayor, para facilitar la aireación. Finalmente, en los climas templados el factor de forma óptimo es un valor intermedio, a causa de la alternancia de demanda energética.



Izquierda: Rascacielos Burj Khalifa, Dubai (2010) de 828 m. de altura. Factor de forma elevado.

Derecha: Reliance Building, Chicago (1895) de 61 m. de altura. Uno de los primeros rascacielos que se construyeron en Chicago. Tiene un factor de forma más pequeño. (Foto del autor).

- Disposición en planta del edificio: La configuración de la forma construida, la orientación, forma y disposición en planta son variables que pueden tener efectos importantes en la conservación de la energía y en la iluminación natural de los espacios interiores. De hecho, es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta para el ahorro energético del edificio. Victor Olgyay ¹⁰ realizó un estudio del efecto de la forma del edificio para los cuatro climas básicos representados por cuatro ciudades norteamericanas. En él, al aplicar el criterio de la forma óptima, es decir, la forma que tiene menos pérdidas de calor en invierno y menos ganancias en verano, llegó a las siguientes conclusiones:

- Clima frío (Minneapolis): La forma óptima en invierno es la 1:1,1. En verano es la 1:1,4. Como la época calurosa es sólo el 20% del año, se adopta como óptima la correspondiente al invierno, es decir, la 1:1,1.

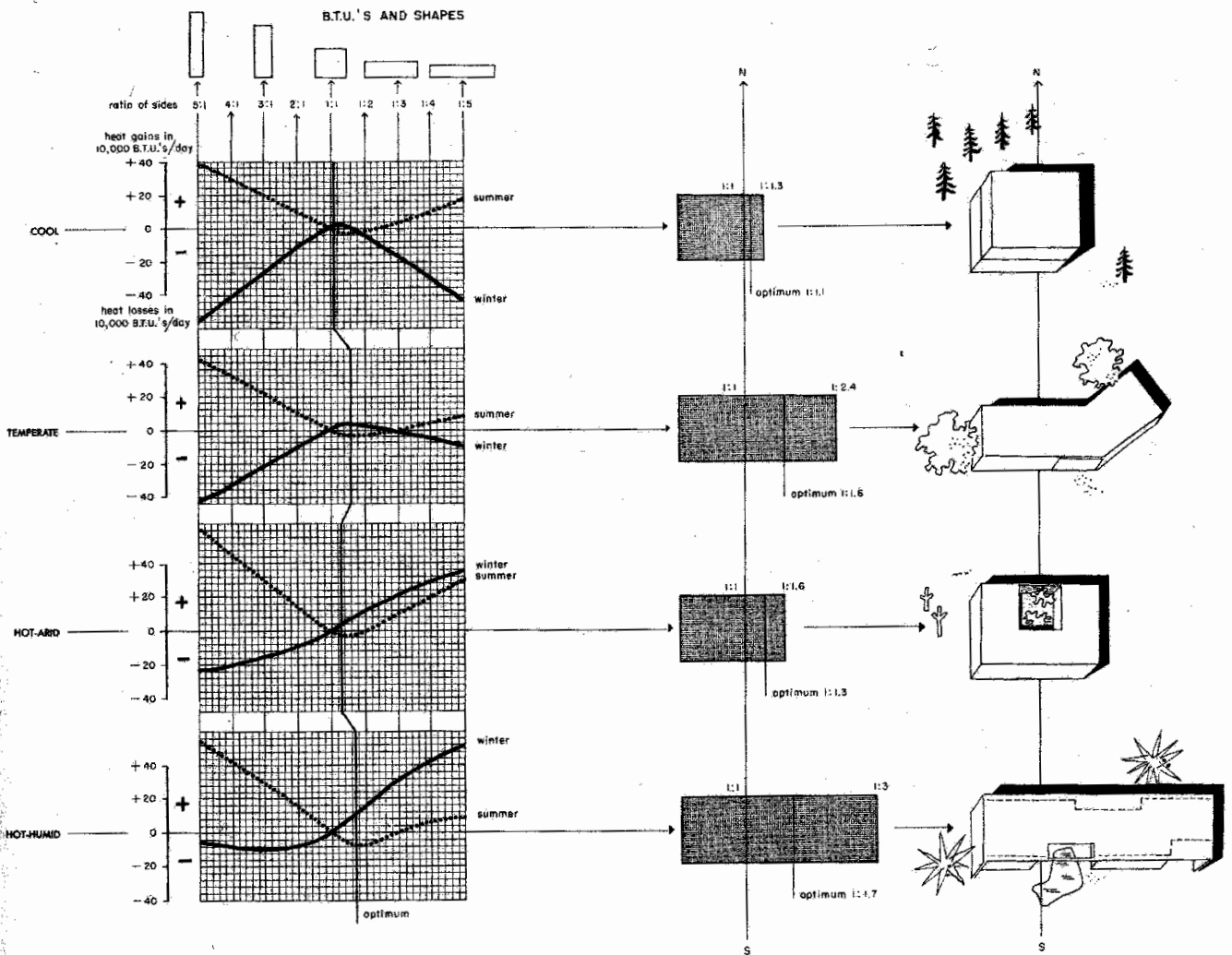
- Clima templado (New York): La forma óptima en invierno es la 1:1,56 y en verano la 1:1,63. La óptima adoptada es la 1:1,6.

¹⁰ Olgyay, Victor. *Arquitectura y Clima*, Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1998, p. 86.

- Clima cálido seco (Phoenix): La forma óptima en verano es la 1:1 mientras que en invierno es la 1:1,6. Como el período sobrecalentado es relativamente mayor al infracalentado, ponderando se adopta como proporción óptima la 1:1,3.

- Clima cálido húmedo (Miami): La forma óptima en verano es la 1:1,7 y en invierno la 1:2,69. Como el período infracalentado es relativamente menor al sobrecalentado, ponderando se adopta como proporción óptima la 1:1,7.

En la figura siguiente se representan los resultados del estudio. En el eje de coordenadas se representan para cada tipo de planta las ganancias en líneas de puntos y las pérdidas en línea continua, ambas en 10.000 Btu/ día, lo que equivale a 10.550 kJ/día o 2,91 kWh/día. De este estudio se puede concluir que para todos los climas, la forma óptima es siempre la alargada según el eje este-oeste.

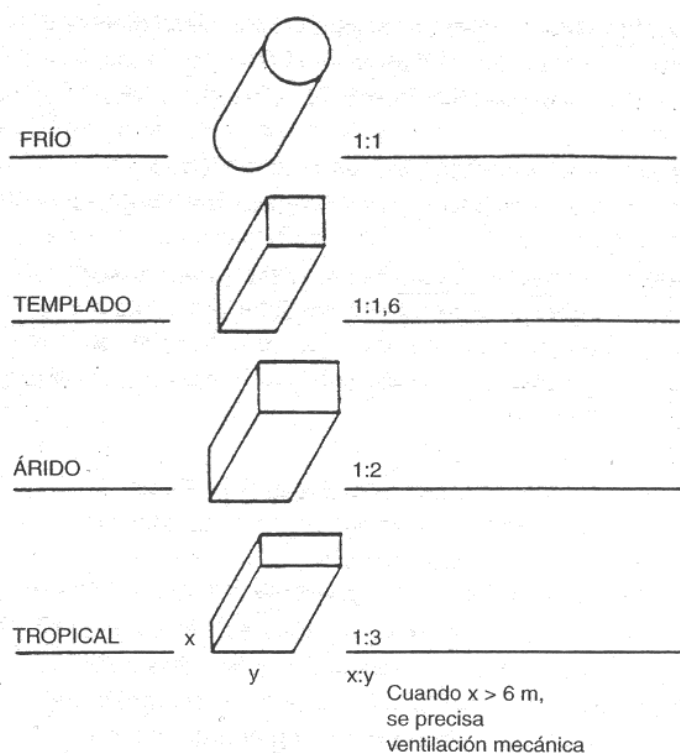


Disposiciones en planta óptimas para los diferentes climas. (Fuente: Olgay ¹¹)

¹¹ Ibidem, p. 89.

Ken Yeang ¹² realiza el mismo tipo de análisis directamente aplicables al edificio en altura. Sus conclusiones difieren ligeramente de las de Olgyay, aunque los valores numéricos resulten casi iguales. Yeang recomienda que en climas templados como el nuestro, el eje largo del edificio vaya de este-oeste, de modo que la fachada larga del edificio esté orientada de norte a sur. Esto permite proyectar la mayoría de ventanas en la fachada sur, de manera que la penetración del sol en el interior del edificio sea máxima, con la consiguiente iluminación natural todo el año y el calentamiento del interior del edificio en invierno, tomando las convenientes medidas de protección para el sol de verano.

En el dibujo ¹³ que viene a continuación se muestra la configuración dimensional óptima de los rascacielos según la zona climática en la que estén ubicados, las orientaciones óptimas de las fachadas principales y la distribución del volumen primario para conseguir la máxima protección solar o ganancia solar, respectivamente.


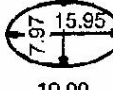
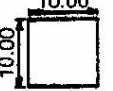
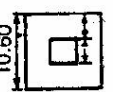
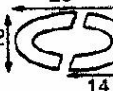
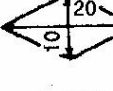
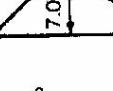


Observando las diversas configuraciones, se puede ver que las latitudes más bajas requieren una forma alargada para reducir la exposición al este y oeste. Esta forma va evolucionando gradualmente hacia una relación 1:1 (cilíndrica) a medida que aumenta la latitud hacia el norte, donde la superficie capaz de aprovechar las ganancias solares ha de ser lo más grande posible.

¹² Yeang, Ken. *El rascacielos ecológico*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2001, p. 203.

¹³ Yeang, Ken. *Bioclimatic Skyscrapers*. Ellipsis, London Ltd, Londres, 1994, p.146.

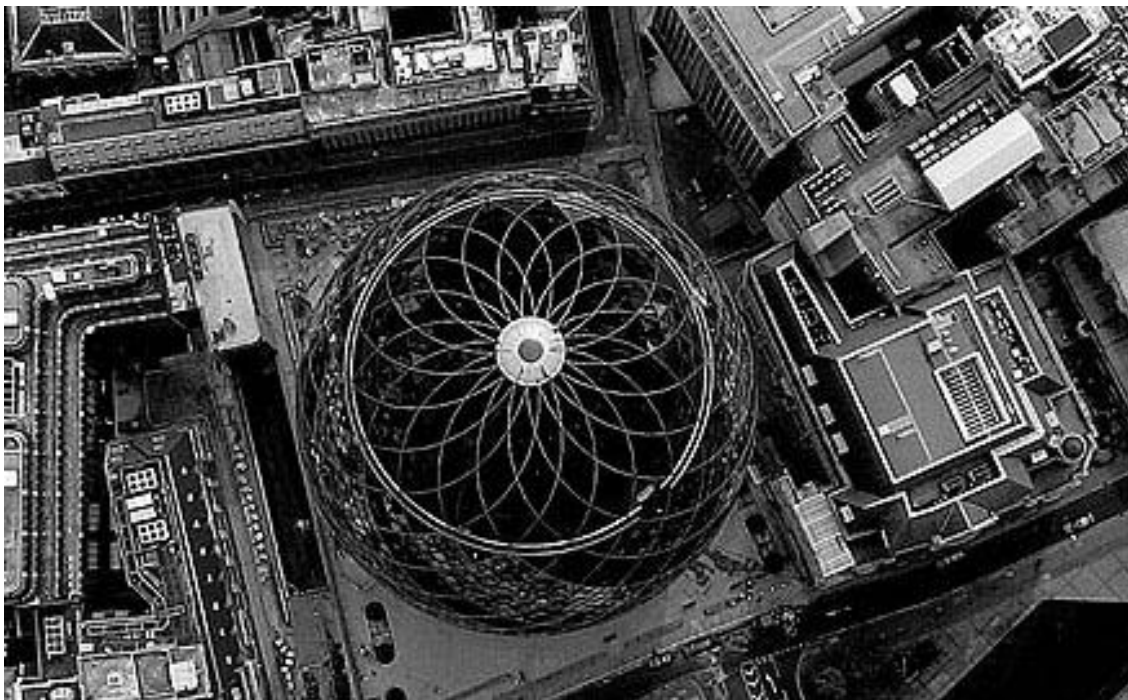
En el siguiente dibujo ¹⁴ se muestra la exposición de las fachadas para distintas formas del edificio. Podemos apreciar que la planta circular es la que tiene menos superficie de fachada. Pese a la menor superficie de fachada de la planta circular, la forma rectangular es la más favorable para el control solar, especialmente en climas templados como los nuestros.

Forma básica de la planta (A)	Superficie de la planta sólo 100 m ² (B)	Pared de fachada de sólo 2,5 m de alto (C)	Suelo + paredes + techo en m ² (D)									
1. Circular		P 35,44 m	SP 88,62 m ²	<table border="1"> <tr><td>S</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>T</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>SP</td><td>88,62</td></tr> <tr><td>Total</td><td>288,62 m²</td></tr> </table>	S	100,00	T	100,00	SP	88,62	Total	288,62 m ²
S	100,00											
T	100,00											
SP	88,62											
Total	288,62 m ²											
2. Elíptica		P 37,59	SP 93,99	<table border="1"> <tr><td>S</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>T</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>SP</td><td>93,99</td></tr> <tr><td>Total</td><td>293,99 m²</td></tr> </table>	S	100,00	T	100,00	SP	93,99	Total	293,99 m ²
S	100,00											
T	100,00											
SP	93,99											
Total	293,99 m ²											
3. Cuadrada		P 40,00	SP 100,00	<table border="1"> <tr><td>S</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>T</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>SP</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>Total</td><td>300,00 m²</td></tr> </table>	S	100,00	T	100,00	SP	100,00	Total	300,00 m ²
S	100,00											
T	100,00											
SP	100,00											
Total	300,00 m ²											
4. Cuadrada con patio		P 42,42	SP 106,06	<table border="1"> <tr><td>S</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>T</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>SP</td><td>106,00</td></tr> <tr><td>Total</td><td>306,00 m²</td></tr> </table>	S	100,00	T	100,00	SP	106,00	Total	306,00 m ²
S	100,00											
T	100,00											
SP	106,00											
Total	306,00 m ²											
5. Doble C		P 80,00	SP 200	<table border="1"> <tr><td>S</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>T</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>SP</td><td>200,00</td></tr> <tr><td>Total</td><td>400,00 m²</td></tr> </table>	S	100,00	T	100,00	SP	200,00	Total	400,00 m ²
S	100,00											
T	100,00											
SP	200,00											
Total	400,00 m ²											
6. Romboidal		P 44,72	SP 111,80	<table border="1"> <tr><td>S</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>T</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>SP</td><td>111,80</td></tr> <tr><td>Total</td><td>311,80 m²</td></tr> </table>	S	100,00	T	100,00	SP	111,80	Total	311,80 m ²
S	100,00											
T	100,00											
SP	111,80											
Total	311,80 m ²											
7. Trapezoidal		P 48,28	SP 120,71	<table border="1"> <tr><td>S</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>T</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>SP</td><td>120,71</td></tr> <tr><td>Total</td><td>320,71 m²</td></tr> </table>	S	100,00	T	100,00	SP	120,71	Total	320,71 m ²
S	100,00											
T	100,00											
SP	120,71											
Total	320,71 m ²											
Cada planta = 100 m ² Todas las plantas tienen el mismo tamaño Todas las alturas libres = 2,5 m		P = Perímetro S = Suelo T = Techo SP = Superficie de pared	<table border="1"> <tr><td>S</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>T</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>SP</td><td>120,71</td></tr> <tr><td>Total</td><td>320,71 m²</td></tr> </table>	S	100,00	T	100,00	SP	120,71	Total	320,71 m ²	
S	100,00											
T	100,00											
SP	120,71											
Total	320,71 m ²											

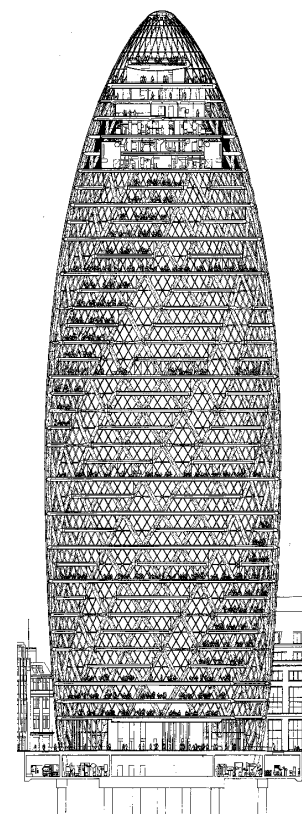
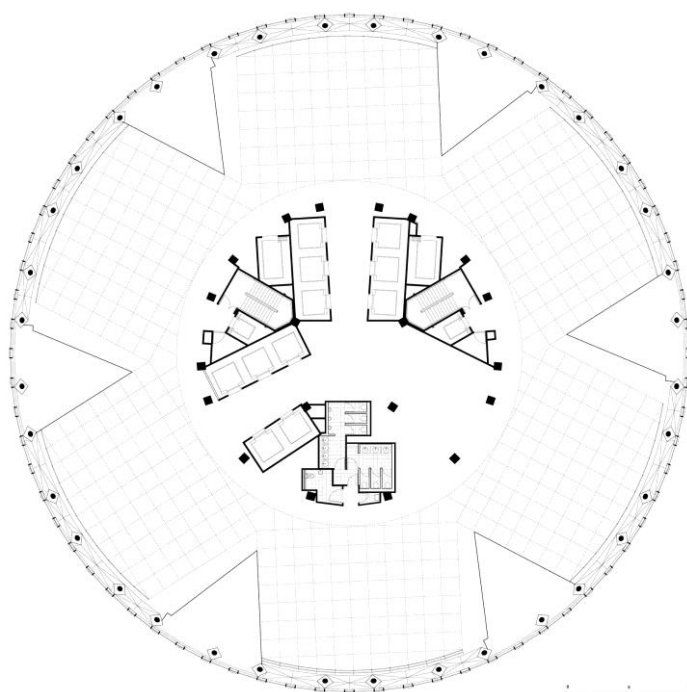
La tendencia actual en los rascacielos de oficinas de baja energía es reducir la anchura de la planta para optimizar la posibilidad de emplear ventilación e iluminación naturales, como solución pasiva de ahorro energético. Esta búsqueda de la iluminación es especialmente importante en climas nórdicos, en los que la luz es un bien escaso y muy apreciado. Por supuesto que en este caso, los costes de la construcción por m² aumentan, si bien el ahorro energético en el uso y mantenimiento del edificio durante su vida útil compensará con creces este incremento. Hay que tener en cuenta que en el uso y mantenimiento del edificio normalmente se consume entre un 60 y un 70% del total de

¹⁴ Yeang, Ken. *El rascacielos ecológico*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2001, p. 209.

energía consumida a lo largo del ciclo de vida ¹⁵ frente a un 20-30% que se produce en la construcción del mismo.



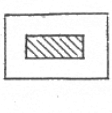
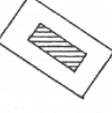
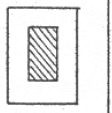
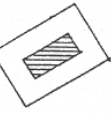
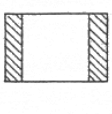
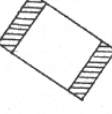
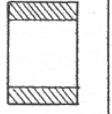
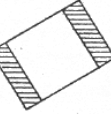
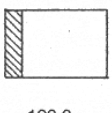
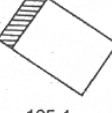
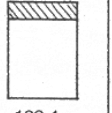
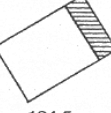
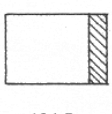
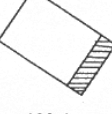
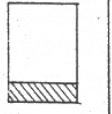
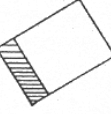
Ejemplo de rascacielos en el que se adoptó la forma curva para minimizar la superficie de fachada en contacto con el exterior para un mayor ahorro energético. Imagen, planta 26 y sección del rascacielos Swiss Re, Londres, Norman Foster. (2004, 180 m de altura).



¹⁵ [SaAS et al. 2007], A. Cuchí y A. Pagés, *Sobre una estrategia para dirigir al sector de la edificación hacia la eficiencia en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI)*, Ministerio de la Vivienda, octubre de 2007. Consulta online, 02/2010, www.mviv.es

- Ubicación de los núcleos de servicios: El emplazamiento de los núcleos de servicio es otro de los mecanismos pasivos de ahorro energético de que dispone el rascacielos, ya que su ubicación determina qué partes de la fachada pueden tener aberturas, lo que a su vez influye de forma considerable en el rendimiento térmico del rascacielos. Es conveniente ajustar la situación del núcleo(s) de servicios de acuerdo con el recorrido del sol, lo que determinará la configuración en planta del rascacielos. Un sistema de doble núcleo de servicios situados en las fachadas este y oeste puede conseguir ahorros significativos si las ventanas se sitúan en las fachadas norte y sur, en todos los climas. Esta disposición evita las ganancias de calor solar en las fachadas más calurosas (este y oeste) de los espacios interiores habitables. Pueden actuar también como amortiguadores eólicos.

En la figura siguiente ¹⁶ se muestra la correlación entre las diferentes ubicaciones y orientaciones del núcleo de servicios y el consumo de refrigeración anual. En líneas generales, se puede concluir que un rascacielos organizado en planta longitudinalmente de norte a sur soporta un consumo de aire acondicionado 1,5 veces mayor en igualdad de condiciones que uno dispuesto longitudinalmente de este a oeste.

	Carga de refrigeración anual (kWh/m ² /año)				Carga media por refrigerac.
	N (S)	NE (SW)	E (W)	SE (NW)	
Núcleo central	 166,4	 170,8	 167,4	 170,1	137% 168,7
Núcleo partido	 121,4	 124,5	 123,6	 123,3	100% 123,1
Núcleo lateral (lado opuesto: pared)	 123,3	 125,4	 122,4	 124,5	102% 125,5
Núcleo lateral (lado opuesto: pared)	 124,5	 128,4	 127,4	 127,9	

Notas:
 Ubicación : Tokio (Latitud 36 °N)
 Superficie planta tipo : 2,400 m²
 Altura de techo : 3.7 m
 Relación ventana/pared : 60 %
 Iluminación : 30 W/m²
 Infiltración : 1 cambio/h
 Personas : 7 m²/p

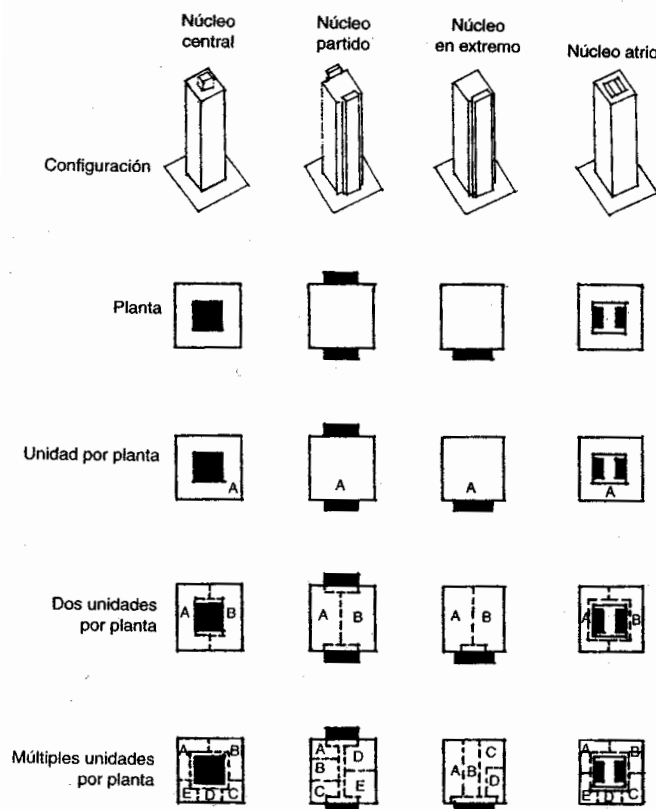
Temp./humedad relativa : 26 °C 50 RH
 Refrigeración : 22 °C 50 RH
 Calefacción : 22 °C 50 RH
 Superficie acondicionada : 65 %
 Entrada de aire exterior : 4.5 m³/m²h
 Longitud/anchura : 1:1.5
 Aislamiento : 25 mm de espuma de poliestireno

Como se aprecia en la figura anterior, el tipo de núcleo que proporciona menor consumo de aire acondicionado corresponde claramente a la configuración de doble núcleo,

¹⁶ Nihon Sekkei, *Energy Conservation Measures for High-Rise Buildings*, JETRO (Japan External Trade Organisation) Publishing, Tokio, 1984.

en el que las ventanas ocupan las fachadas norte y sur, y los núcleos las fachadas este y oeste. Por el contrario, el tipo de núcleo con mayor consumo de aire acondicionado es el de configuración central, en el que las aberturas principales ocupan las fachadas suroeste y noreste.

En la figura siguiente ¹⁷ aparecen las diversas configuraciones del núcleo de servicios:



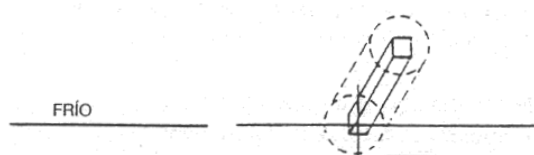
De las diversas posiciones posibles para el núcleo de servicios (núcleo central, doble núcleo o núcleo a un solo lado), la más conveniente es la de doble núcleo. Las ventajas medioambientales de una posición periférica del núcleo de servicios son las siguientes:

- Ahorro de energía en climatización de los vestíbulos de ascensores, dado que pueden disponer de ventilación natural.
- Ahorro de energía en iluminación de los vestíbulos de ascensores, dado que pueden disponer de iluminación natural.
- Efectos favorables de amortiguación solar y/o eólica.
- Disminuye el coste inicial y de funcionamiento del rascacielos ya que evita la existencia de un conducto en sobrepresión contra incendios.
- Facilita una doble evacuación inmediata del edificio en caso de emergencia.

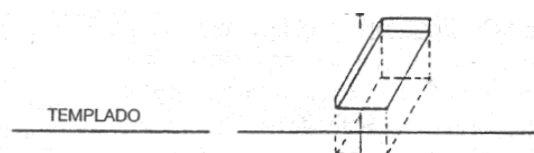
¹⁷ Yeang, Ken. *El rascacielos ecológico*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2001, p. 205.

En los dibujos ¹⁸ siguientes se muestra la ubicación óptima, según Ken Yeang, de los volúmenes primarios del rascacielos (núcleos, pozos de ascensores, cajas de escaleras) en función del clima. La disposición del volumen primario puede aprovecharse para mejorar el comportamiento energético del rascacielos, ya que su posición puede ayudar a proteger al edificio del sol o a retener el calor solar dentro de la forma edificada.

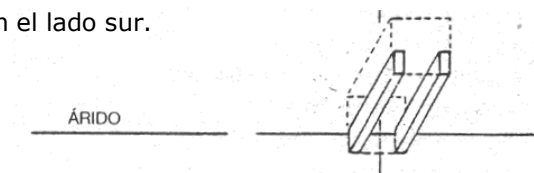
. La zona climática fría requiere el máximo perímetro orientado hacia el sol, para fomentar la penetración de los rayos solares. Por lo tanto, el núcleo vertical se ubica en el centro del edificio, con el fin de que no bloquee los rayos solares y para retener el calor solar dentro de la forma edificada.



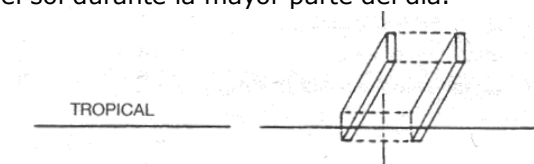
. En la zona templada, los núcleos verticales se ubican en la cara norte, para permitir unas ganancias solares máximas en la fachada sur durante el invierno.



. En la zona árida, los núcleos deben ubicarse en los lados este y oeste, pero con una importante protección solar durante el verano. Por lo tanto, los núcleos se sitúan en los lados este y oeste, aunque principalmente en el lado sur.



. Para la zona tropical, los núcleos se sitúan en las fachadas este y oeste del edificio, de forma que lo protejan de los ángulos bajos del sol durante la mayor parte del día.

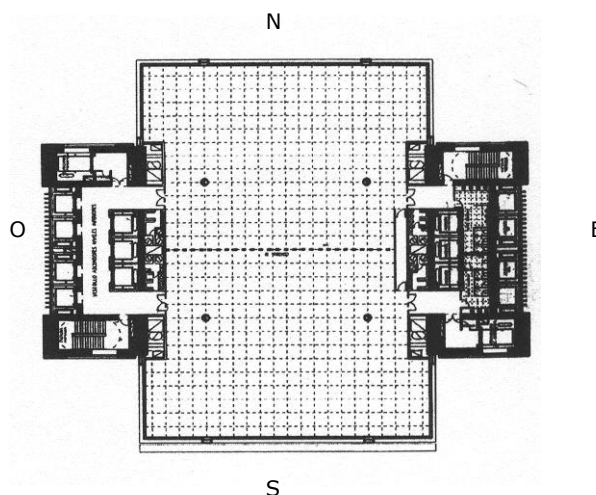


Ubicación de los volúmenes del edificio (núcleos, pozos de ascensores, cajas de escalera)

¹⁸ Ibidem, p.204.



Fotografía y planta del rascacielos de Norman Foster en plaza Castilla, Madrid (altura 250 m.). Podemos observar la configuración del mismo con doble núcleo situado en las fachadas este y oeste, dejando así fachadas totalmente acristaladas hacia las mejores orientaciones climáticas y visuales: norte (sierra de Madrid) y sur (centro de la ciudad).



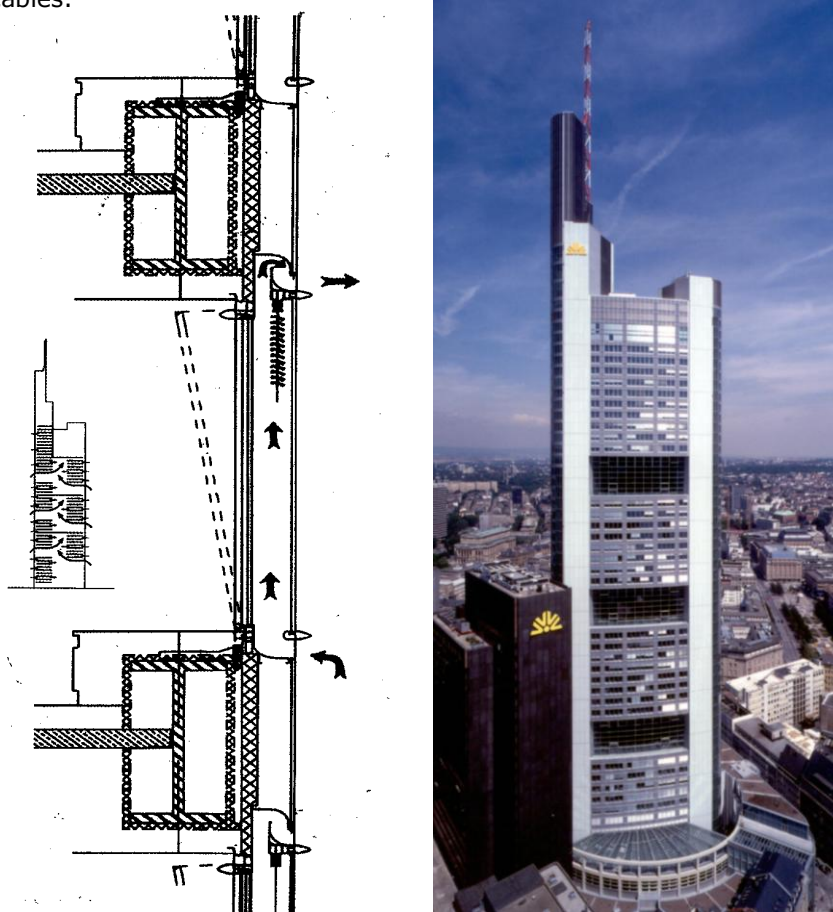
5.1.3 CONFIGURACIÓN DE LA PIEL:

La configuración de la piel puede convertirse en un mecanismo pasivo para el ahorro en el consumo de energía de calefacción e iluminación a lo largo de la vida útil del edificio. Los diferentes aspectos que caracterizan la piel del rascacielos y que pueden influir en un ahorro energético para el edificio son:

- **Perforación:** La perforación nos da una idea de la permeabilidad de la piel al paso del aire, la luz y el calor. Para que el rascacielos tenga una buena respuesta energética ante las diversas condiciones climáticas, conviene que la permeabilidad de la piel pueda ser controlable y modificable. Para ello es fundamental la presencia de aberturas regulables que actúen como tamices y permitan ventilar de forma natural los espacios, el control de la ventilación transversal, de las vistas al exterior y una protección solar adecuada. La filosofía del planteamiento ecoeficiente es totalmente opuesta al uso de pieles selladas herméticamente, las cuales solo pueden conseguir el nivel de confort en el interior del espacio por medio de instalaciones artificiales de iluminación, calefacción y refrigeración que nunca funcionan a gusto de todos.

Además, los edificios herméticos poseen una ventilación deficiente que produce una concentración de agentes contaminantes diversos y alérgenos. Si a estos elementos se le añaden las altas temperaturas que se consiguen con la calefacción, se obtiene un excelente caldo de cultivo para virus, bacterias y hongos, lo que, sumado a otros factores, da lugar a la patología conocida como "síndrome del edificio enfermo". El síndrome del edificio enfermo es, tal y como viene definido por la OMS, el conjunto de enfermedades originadas o estimuladas por la contaminación del aire en espacios cerrados. Su origen se halla en diversos agentes causantes, como son la mala ventilación, la descompensación de temperaturas, la acumulación de cargas iónicas y electromagnéticas, presencia de partículas en suspensión, gases y vapores de origen químico y aerosoles.

Para evitar la aparición de esta afección y para un mayor ahorro energético, conviene que la piel del edificio sea permeable a la luz y el aire y disponga de aberturas al exterior controlables y modificables.



Sección y vista del rascacielos Commerzbank (altura: 258,7 m), Frankfurt, de Norman Foster (1997). Ejemplo de rascacielos en el que la permeabilidad de la piel es controlable y modificable, gracias a la posibilidad de abrir las ventanas para ventilar el espacio interior.

- Aislamiento: Otro modo efectivo de reducir el consumo de energía en el edificio es incrementar el aislamiento de la envolvente del edificio. El aislamiento reduce el ritmo de circulación del calor a través de los elementos constructivos. Ello puede redundar en un significativo ahorro de energía y en una considerable mejora del bienestar, especialmente en los climas fríos. Hay diversas formas de conseguirlo:

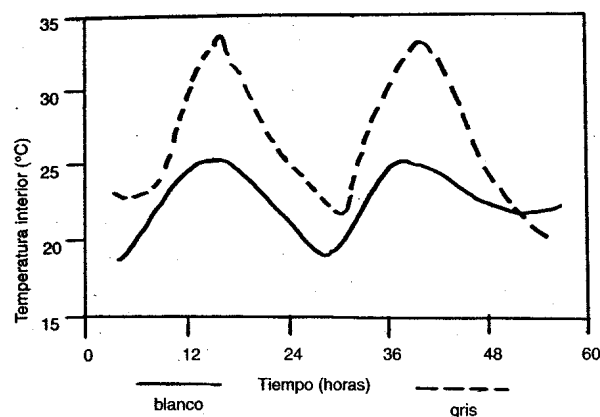
- Aumentar el aislamiento de los muros exteriores y de los vidrios utilizados para reducir las fugas. Para reducir las pérdidas por conducción en ventanas, se debe utilizar doble vidrio con cámara de gas inerte y para reducir las pérdidas por radiación de onda larga se debe utilizar vidrio de baja emisividad. Por la noche se pueden reducir notablemente las pérdidas de calor a través de las ventanas utilizando aislamiento térmico nocturno variable (persianas, contraventanas).

- Rebajar la relación entre las superficies acristaladas y macizas.

- Eliminar las fugas caloríficas en las carpinterías utilizando carpinterías con mecanismos de rotura de puente térmico.

El CTE, para conseguir que los edificios sean más eficientes energéticamente, establece la obligatoriedad de disponer de una envolvente con unas características térmicas que limiten la demanda energética, permitiendo alcanzar el bienestar térmico en función del clima y el uso del edificio; evitando asimismo las humedades de condensación y los puentes térmicos.

- Color de la piel: Una forma de reducir el consumo de aire acondicionado en verano en el rascacielos es el uso de colores claros en la fachada y la cubierta del mismo. Los colores claros pueden llegar a reducir las necesidades de refrigeración en un 40%, tal y como queda patente en el siguiente gráfico ¹⁹.



¹⁹ Givoni, B., *Passive and Low-Energy Cooling of Buildings*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1994.

En climas como el de Barcelona y Madrid, una forma eficiente de proteger las fachadas de la radiación solar consiste en seleccionar ciertos materiales con unas características de absorción y emisión selectivas para su composición. Si se utilizan en la envolvente materiales de colores claros que reflejen las radiaciones solares y liberen con mayor facilidad el calor absorbido en forma de radiación térmica, proporcionarán temperaturas más bajas en el interior del edificio, con el consiguiente ahorro energético. Tal y como explica Rosenfield ²⁰, para reducir el efecto de "isla de calor" en las ciudades y rebajar el gasto global en aire acondicionado, el color del revestimiento de la fachada debe ser lo más claro posible.



Ejemplo de rascacielos de color claro. Torre Picasso, Madrid.

5.1.4 SISTEMAS DE CONTROL AMBIENTAL:

Los distintos mecanismos pasivos de control ambiental de que dispone el rascacielos se dividen, tomando como referencia el esquema desarrollado por el profesor Rafael Serra ²¹, en sistemas de climatización y de iluminación.

5.1.4.1 SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN NATURAL

Son el conjunto de componentes del rascacielos cuya función principal es mejorar su comportamiento climático. La clasificación de los mismos la haremos según su función. Se dividen en:

²⁰ [Rosenfield et Al.], "Painting the Town White and Green", en *Technology Review*, febrero/marzo de 1997, p.52-59.

²¹ Serra, Rafael. *El disseny energètic a l'arquitectura*. Ed. UPC, 3ª ed. Barcelona, 1999, p.84.

- 5.1.4.1.1 SISTEMAS CAPTADORES:

Conjunto de componentes de un edificio que tienen como función la captación de energía de la radiación solar y su transmisión al interior del mismo en forma de calor. Se pueden clasificar en:

- Sistemas captadores directos: La energía radiante penetra directamente en el ambiente interior que se quiere acondicionar. El funcionamiento de estos sistemas es el siguiente: la radiación solar atraviesa las superficies transparentes de ventanas, lucernarios, etc. en forma de radiación de onda corta, y una vez en su interior, es absorbida por las superficies interiores calentándolas. Posteriormente, estas superficies ceden la energía acumulada al ambiente por convección y radiación de onda larga con un cierto retraso en el tiempo. En estos sistemas, se recomienda el uso de aislamientos móviles en las aberturas para mejorar el aislamiento nocturno del edificio. Asimismo, tienen un rendimiento de captación (relación entre la energía que penetra en el ambiente interior y la energía radiante incidente) de entre un 40-70% según el tipo de vidrio, carpintería y grado de limpieza. El factor de retraso (expresa la uniformidad en el tiempo de la penetración de energía en un ciclo de 24 horas; es la relación entre la energía que penetra en las horas sin radiación y la que entra como media diaria de las 24 horas del ciclo) es prácticamente nulo.²²



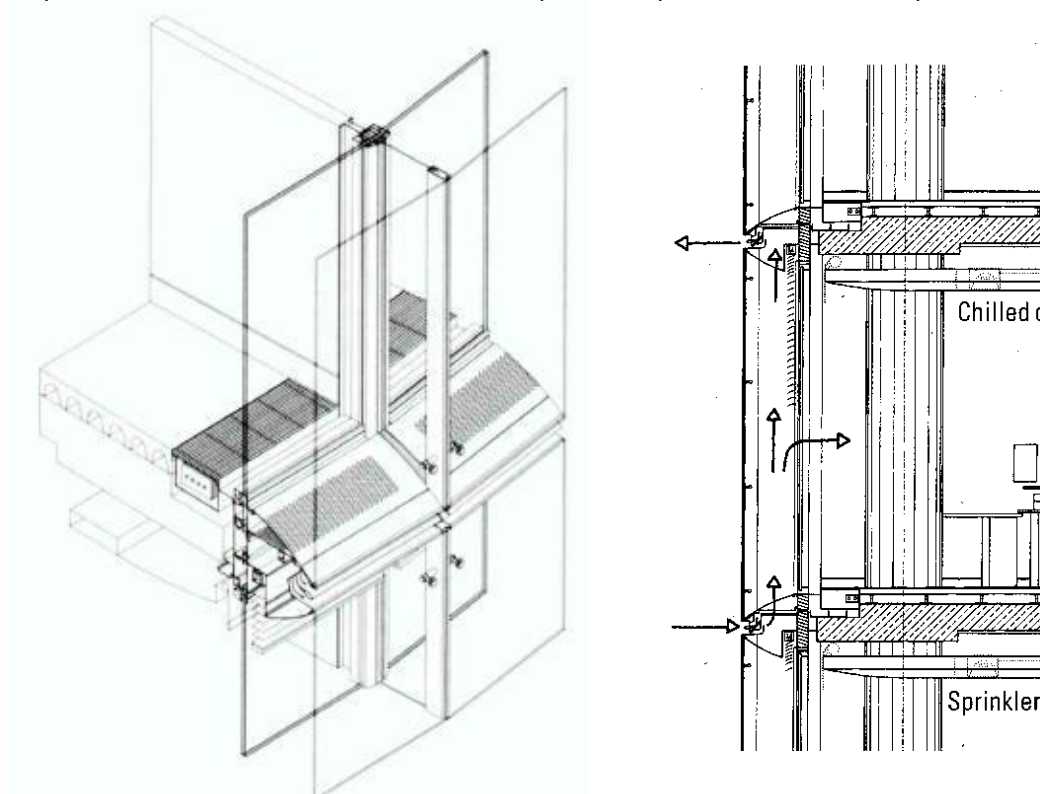
Lucernario de la torre Swiss Re de Norman Foster, Londres, 2004. (180 m. de altura)

²² Ibidem, p.85.

- Sistemas captadores semidirectos: Se interpone un espacio entre el ambiente interior y exterior que capta la energía solar. Este espacio intermedio, por el efecto invernadero, tiene una gran capacidad para captar radiación y, por tanto, unas condiciones térmicas medianas mucho más altas que las del exterior, con una oscilación de temperaturas muy acentuada. La radiación incidente en el invernadero es absorbida en este espacio, donde se convierte en calor que se puede ceder al ambiente interior que se quiera acondicionar, por conducción o convección.

Estos sistemas tienen rendimientos variables entre 12-30%, dependiendo de su forma, (mejor cuanto más compacta) y de su sistema de comunicación con el interior (mejor con aislamiento móvil). Su factor de retraso gira alrededor de 0,3 si la comunicación con el interior es por convección y 1 si la transferencia se hace a través de muros separadores poco perforados y con cierta inercia.²³

Un ejemplo de sistema captador semidirecto aplicado en el rascacielos lo constituye la fachada de vidrio de doble piel ventilada, como la que tiene el rascacielos RWE AG. En él, durante las estaciones frías, se pueden abrir las ventanas interiores para que el calor acumulado en la cámara se aproveche para calefactar los espacios interiores.

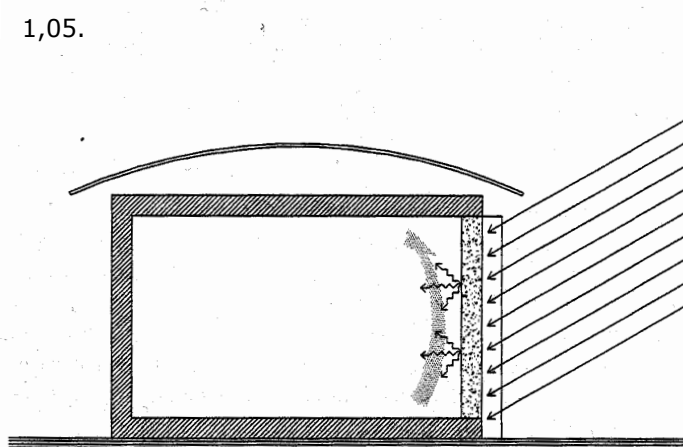


Vista axonométrica y sección de la fachada de doble piel ventilada del edificio RWE AG de Ingenhoven, Overdiek, Kahlen & Partners en Essen, Alemania. (1996, 163 m. de altura).

²³ Ibidem. Pág. 86

- Sistemas de captación retardada por acumulación o indirectos: Son aquellos sistemas en los que la captación se hace mediante un elemento acumulador que hace de almacén de energía y que posteriormente cede el calor al espacio interior. La energía radiante, después de atravesar un vidrio, es absorbida y acumulada en forma de calor en un elemento opaco de gran capacidad térmica. Desde este elemento se cede el calor al ambiente interior en forma de radiación de onda larga y por convección superficial. Se produce un cierto retraso y una reducción importante de la oscilación de temperaturas. La ventaja de este sistema en relación a los sistemas de captación directa es que se puede independizar el momento de la captación solar de aquel otro en el que se quiera que penetre el calor en el edificio, fijándolo con cierta precisión, ajustando el volumen y espesor del cerramiento al desfase de horas preciso. El gran inconveniente es que hay una pérdida de la energía recibida muy elevada, al retroceder parte de ella al exterior. Ésta puede ser reducida con aislamientos móviles y vidrios con cámara de aire. Según la situación del elemento acumulador de calor, éstos se pueden clasificar en sistemas indirectos por fachada, techo o suelo:

- a. **Muro de inercia**: Es un sistema indirecto situado en la fachada. Tiene un elemento de acumulación vertical, protegido por un vidrio y acabado con una superficie selectiva cálida o de color oscuro. Este elemento suele ser un muro de fábrica de ladrillo, hormigón o piedra, de grosores de 30 a 40 cm. Esta masa retrasa unas 12 horas el máximo aporte de energía al interior del edificio. El calor atraviesa el muro y pasa al interior en forma de onda larga y por convección superficial. Tiene un rendimiento de un 18% y un factor de retraso de 1,05.



Captación indirecta con un muro de inercia. Fuente: Rafael Serra ²⁴.

²⁴ Ibidem, p.87.

- b. **Muro Trombe:** El muro Trombe es un caso particular del caso anterior, donde se añaden unas perforaciones en la parte superior e inferior del muro, para comunicar la cámara de aire que hay entre el vidrio y el muro con el ambiente interior. Tiene un rendimiento de un 27% y un factor de retraso de 0,8. Una ubicación óptima para la aplicación de este sistema en los rascacielos es en las fachadas exteriores de los núcleos de servicios.

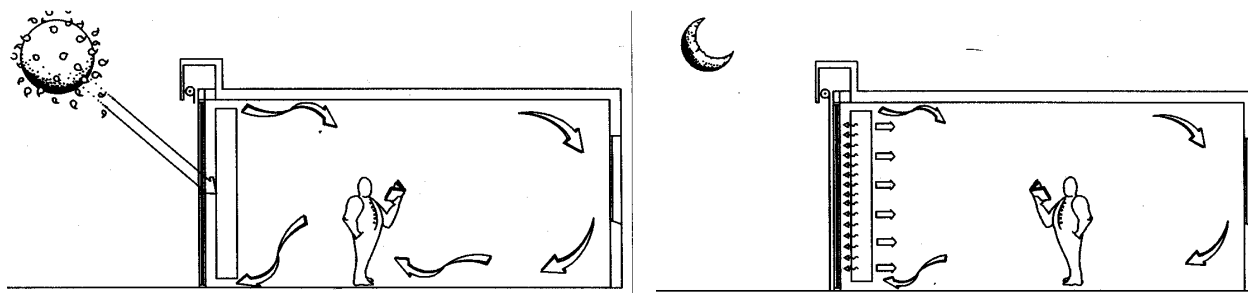
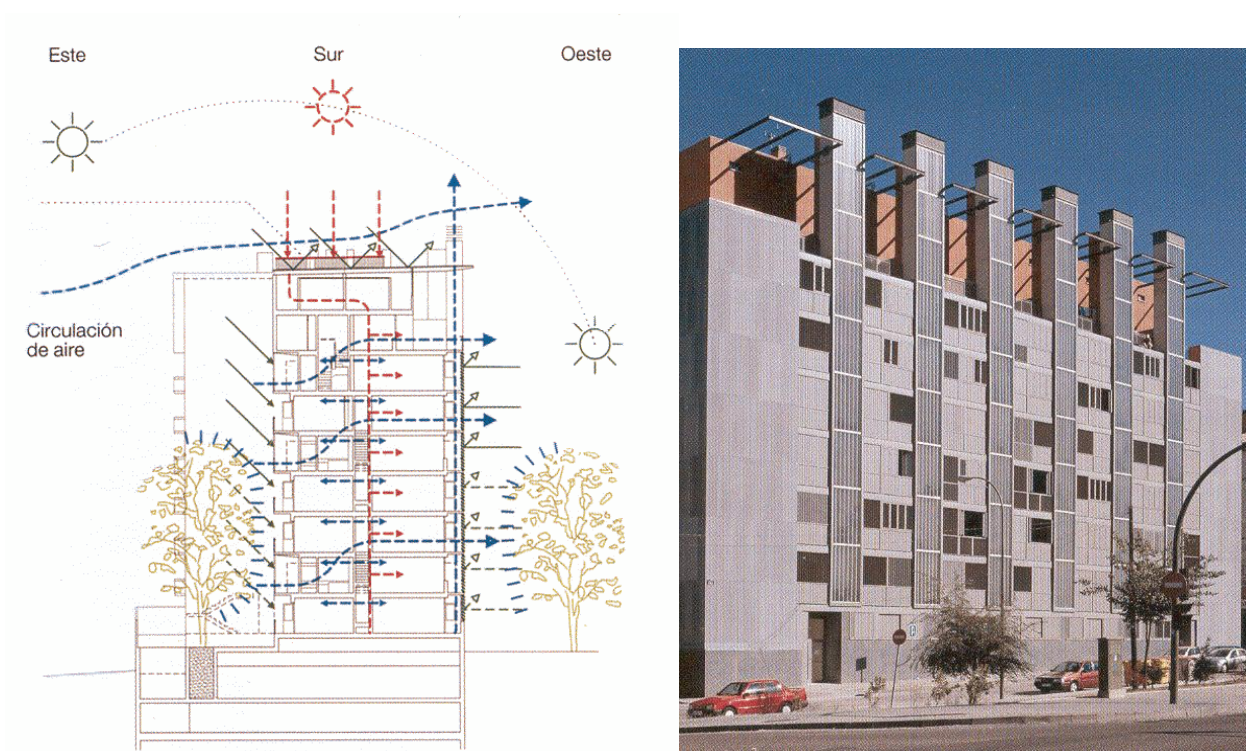


Fig. Funcionamiento del muro Trombe de día y noche. Fuente: F. Javier Neila ²⁵



Vista y sección de edificio de viviendas en Madrid que incorpora un sistema de enfriamiento pasivo mediante chimeneas por convección forzada con muros trombe. M. Muelas y A. Mateo, 2004.

²⁵ Neila, F.J. *Arquitectura Bioclimática en un entorno sostenible*. Ed. Munilla-Lería, Madrid, 2004, p.268.

- c. **Muro de agua:** El muro de agua es un tipo de muro de inercia con la pared formada por contenedores de agua que almacenan la energía que pasa por radiación y convección, prácticamente sin retraso. Tiene un rendimiento de un 22% y un factor de retraso de 0,7.

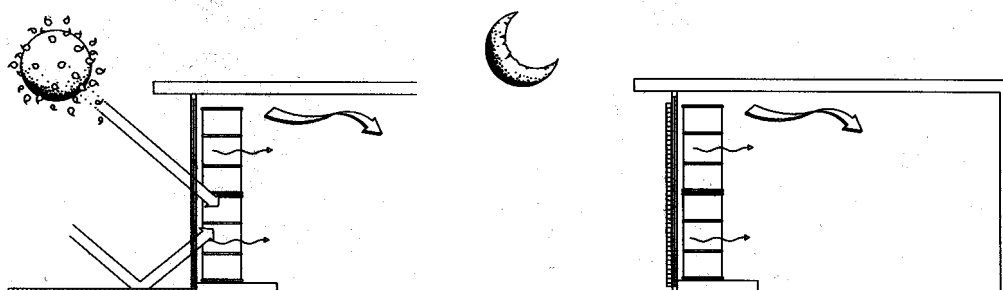
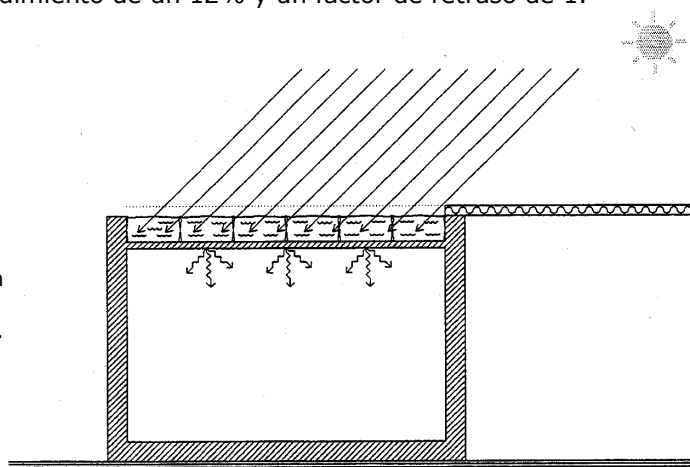


Fig. Funcionamiento del muro de agua. Fuente: F. Javier Neila ²⁶

- d. **Sistemas acumuladores por techo:** Son aquellos que tienen un elemento de acumulación horizontal en la cubierta, que capta la radiación y la cede al interior. El caso más habitual es la cubierta de agua, que está hecha con bidones o sacos de plástico transparente llenos de agua, sobre un forjado pintado de color oscuro y buen conductor del calor. Usa la masa de agua como almacén de calor, que en invierno capta la radiación solar y la remite hacia el ambiente interior. En verano pueden refrigerar y refrescarse por la noche por emisión de radiación hacia el cielo. La energía acumulada en la cubierta pasa al interior por conducción atravesando la cubierta con un cierto retraso. Del techo al ambiente solo hay cesión por radiación, de forma que se reduce considerablemente el rendimiento del sistema. Tiene un rendimiento de un 12% y un factor de retraso de 1.

Captación indirecta con una cubierta de agua.

Fuente: Rafael Serra ²⁷.



²⁶ Ibidem, p.266.

²⁷ Serra, Rafael. *El disseny energètic a l'arquitectura*. Ed. UPC, 3ª ed. Barcelona, 1999, p.89.

- e. **Sistemas acumuladores por suelo**: Para la descripción de este mecanismo nos remitimos a la definición que da Rafael Serra: Son aquellos que tienen un elemento captador y acumulador de energía solar situado bajo el suelo del ambiente interior que se quiere acondicionar. Este elemento captador y acumulador suele ser un depósito de piedras o agua para conseguir una buena masa térmica, muy bien aislado, que capta la energía radiante por una superficie orientada al sur. La energía solar pasa desde la superficie de captación al interior del depósito por convección natural del aire o agua. La cesión de energía a ambiente interior, en el caso más inmediato, se hace desde el suelo por convección superficial y radiación de onda larga, y se produce un cierto retraso y amortiguación de la oscilación. También se puede facilitar la convección directa haciendo pasar el aire caliente por el acumulador térmico y haciendo aberturas regulables hacia el interior. Tiene un rendimiento de un 22% y un factor de retraso de 0,95.

En resumen, los sistemas de captación retardada por acumulación son mecanismos que en edificios de pequeña escala pueden llegar a ser muy beneficiosos en la mejora del confort térmico, sin embargo, en un edificio de altura, dada la magnitud de los espacios que tendría que acondicionar, tenemos serias dudas acerca de la eficacia de su implantación, exceptuando la aplicación del muro Trombe en los núcleos de servicios.

- **Sistemas captadores independientes**: Son los sistemas de climatización natural donde la captación de energía radiante, su acumulación y cesión al interior que se quiere acondicionar se hace con componentes que son independientes entre ellos. La transferencia de calor entre componentes se hace por flujos naturales de aire o agua, que circulan por conductos, que conectan entre ellos los diferentes elementos.

Estos sistemas, al igual que sucede con los sistemas de acumulación, son muy eficaces en edificios pequeños, pero no en edificaciones de altura, por lo que vemos difícil su implantación en los mismos.

- 5.1.4.1.2 SISTEMAS DE VENTILACIÓN Y TRATAMIENTO DEL AIRE: Tienen como misión favorecer el paso del aire por el interior del edificio, así como la renovación y mejora de sus condiciones de temperatura y humedad. El viento es otra fuente natural de energía para el edificio. Conociendo la dirección, intensidad, y distribución de los vientos dominantes a lo largo del día y de las estaciones del año se puede aprovechar una ventilación y refrigeración naturales más efectivas.

Un claro ejemplo de aprovechamiento del viento para mejorar las condiciones de confort de viviendas lo constituye el ensanche de El Vedado en La Habana (Cuba). La orientación de sus calles y edificios y la suave pendiente del terreno hacia el mar permiten que las deseadas brisas marinas atemperen el calor extremo del Caribe en esa parte de la ciudad, además de ofrecer unas excelentes vistas sobre el océano.

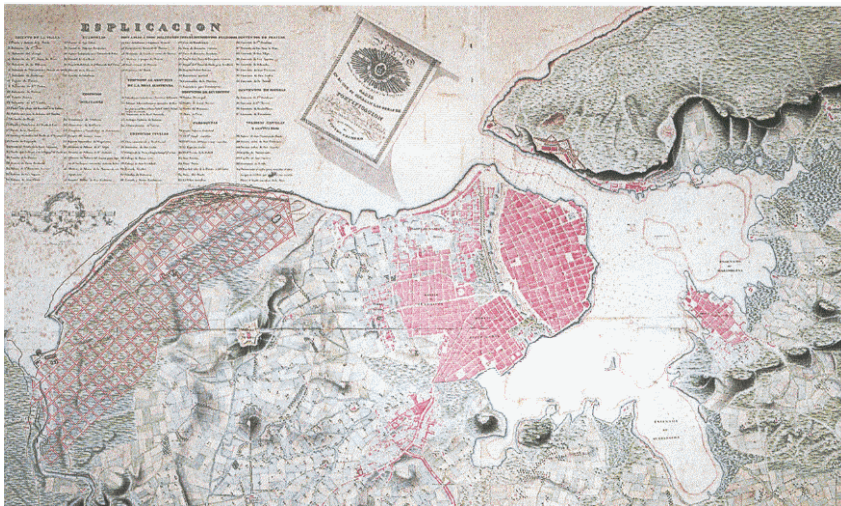


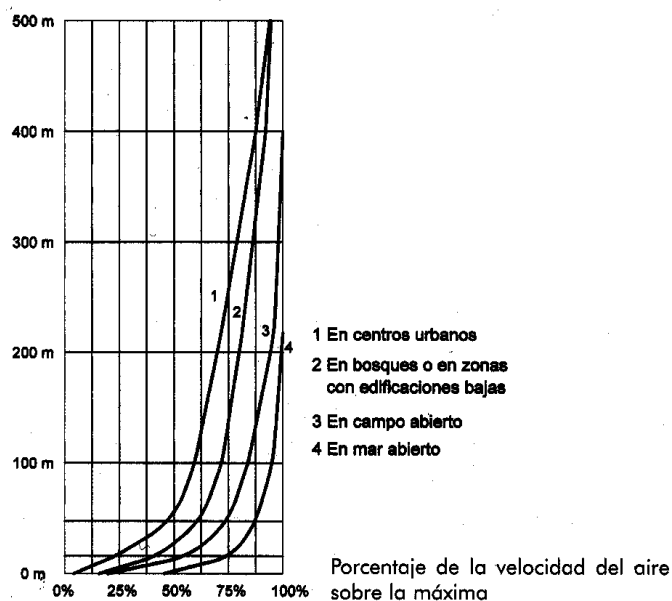
Imagen izquierda: Plano de la Habana de F. Lemaur, con el barrio de El Vedado en la parte superior izquierda (1834).

Imagen inferior: Vista aérea actual del barrio de El Vedado.



La ventilación natural en los edificios en altura puede resultar compleja ya que la velocidad del viento crece de un modo significativo con la altura, como se puede apreciar en el siguiente gráfico ²⁸.

Altura sobre el suelo



En consecuencia, los sistemas que se empleen deberán moderar el efecto del viento, reduciendo su velocidad. Para ello, debe hacerse pasar el aire por un dispositivo de filtro que lo controle. El más sencillo es una doble piel en la propia fachada o en la ventana, de forma que el aire, al pasar entre ellas reduzca su velocidad. Otro sistema consiste en hacer pasar previamente el aire por amplios atrios, patios o cámaras, antes de introducirlo en el interior.

*Mecanismos para mejorar el rendimiento energético y la calidad del aire de un rascacielos por medio de la ventilación:

A- Sistemas generadores de movimiento de aire: Son componentes del edificio que fuerzan el paso del aire y su movimiento en el interior del edificio por efecto de depresiones y sobrepresiones de aire. Estos sistemas se caracterizan por el caudal de aire de entrada o salida del edificio, que renueva el aire interior y puede refrescar a los ocupantes con el movimiento de aire que genera. Los principales son:

A.1. Fachada de doble piel con cámara ventilada:

Muchos rascacielos en la actualidad utilizan como mecanismo pasivo de ahorro energético el sistema de doble piel de vidrio ventilada en las fachadas. Esta solución está compuesta por dos hojas de vidrio, una exterior abierta, otra interior estanca y una cámara de aire intermedia ventilada. El sistema normalmente va acompañado de un dispositivo de control solar tipo persiana ubicado en la cámara de aire entre las dos

²⁸ Neila, F.J. *Arquitectura Bioclimática en un entorno sostenible*. Ed. Munilla-Lería, Madrid, 2004, p.312.

pieles que refleja la mayor parte de la radiación solar al exterior. La ventilación de la cámara de aire intermedia depende de las presiones eólicas y del efecto chimenea. El efecto chimenea se basa en el principio de que el calor absorbido e irradiado por las persianas y el vidrio asciende por el interior de la cámara. El aire más fresco es aspirado hacia el interior de la cámara para sustituir al aire caliente ascendente; de esta manera se produce una corriente de aire para ventilar las ganancias caloríficas solares. El rendimiento del sistema depende de la correcta ventilación de la cámara y de la presión eólica exterior. Dado que la presencia e intensidad del viento son variables, también lo es su rendimiento.

Según Ken Yeang ²⁹, para que el efecto chimenea sea efectivo, el espesor de la cámara de aire entre las dos hojas debe ser superior a 250-300 mm y la dimensión del respiradero exterior debe ser al menos de 150 mm.

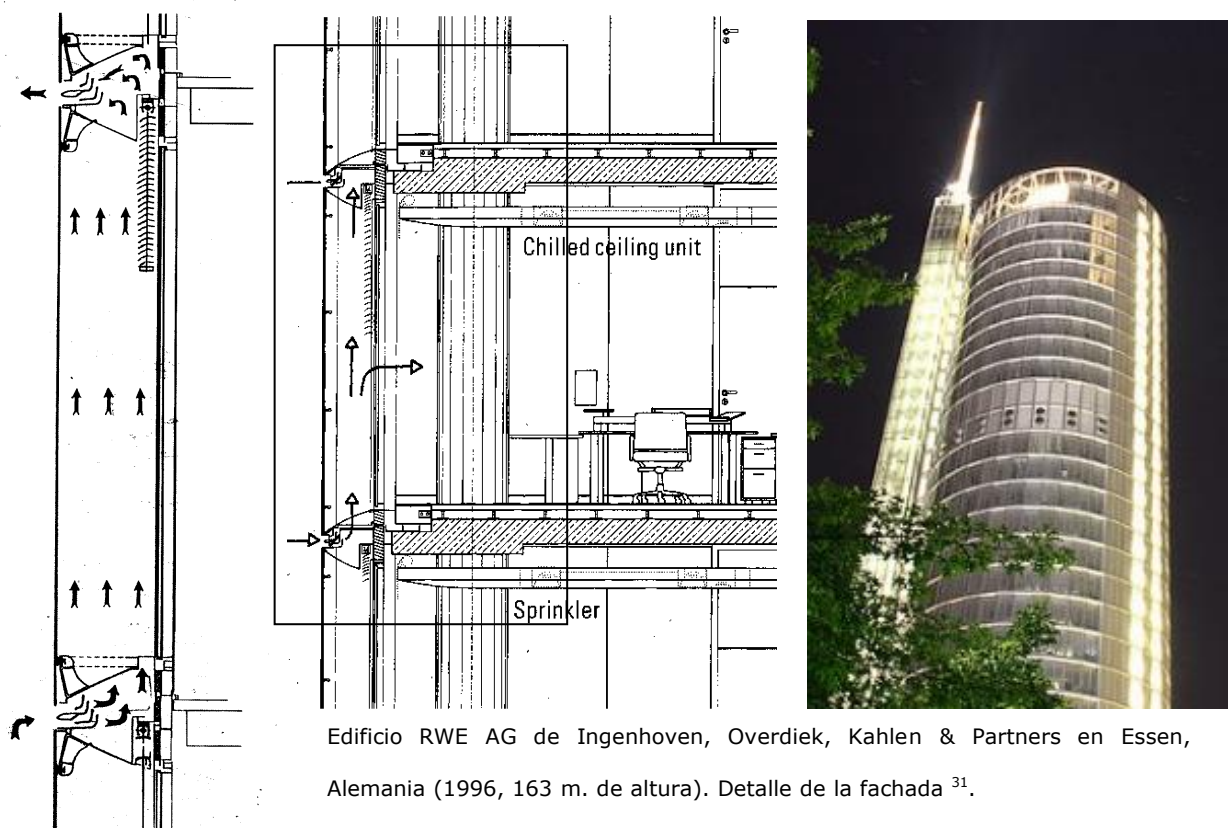
El resultado es una fachada con un espesor considerable, pesada y cara, por la doble superficie de acristalamiento y la necesidad de hacer practicable la hoja interna para mantenimiento. Presenta un funcionamiento eficiente de ahorro energético en climas nórdicos pero no así en nuestras latitudes, especialmente en verano, ya que no evita el efecto invernadero e incluso con persianas venecianas se recalienta el aire de la cámara. La disminución de su eficacia en nuestros climas de verano se debe al recalentamiento del aire de la cámara, por radiación y por el calor cedido por las celosías, lo que provoca que no se produzca convección del aire, por lo que el calor no se disipa. En invierno, la cámara actúa como aislante si está cerrada, produciendo el efecto beneficioso de aumentar la temperatura del aire de la cámara debido al calentamiento de las protecciones solares que aloja. Sin embargo, si la cámara está abierta, la introducción de aire frío hace disminuir la eficacia del sistema. Tiene, no obstante, la ventaja de que mitiga el ruido del entorno, reduce las presiones de los vientos fuertes en los edificios en altura, protege los elementos de control solar del ambiente exterior y permite la ventilación natural de los espacios interiores. No es recomendable su utilización en zonas sometidas a fuertes ráfagas de viento, ya que las persianas sufren fuertes oscilaciones cuando la velocidad del viento alcanza los 30 m/s ³⁰.

²⁹ Yeang, Ken. *El rascacielos ecológico*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2001, p. 214.

³⁰ *Ibidem*, p. 215.

Un ejemplo de rascacielos con doble piel de vidrio ventilada es el edificio RWE AG de Ingenhoven, Overdiek, Kahlen & Partners en Essen, Alemania. Sus fachadas están constituidas por una doble capa de vidrio que dejan entre ellas una cámara ventilada de 50 cm. En ella, un dispositivo denominado "boca de pez" integra los dispositivos de regulación de la radiación solar, la luz y la ventilación. La cámara de aire actúa como una antesala de la ventilación permitiendo la regulación de la velocidad, caudal y calidad.

Cada despacho dispone de un sistema natural de gestión de las condiciones ambientales, para que cada usuario pueda regularlas individualmente. La ventilación natural puede realizarse alrededor de un 70% del año. La piel interior está aislada térmicamente y consiste en puertas correderas de vidrio de la altura de toda la estancia que pueden ser abiertas por medio de una manivela para ventilar o para labores de limpieza. Además, dispone en el espacio entre ambas cámaras de unas persianas venecianas de aluminio para proteger el interior del deslumbramiento y la luz directa del sol. Cada dos vanos, el hueco tiene una ranura de escape superior y otra inferior. Para evitar que el aire caliente entre en el hueco situado inmediatamente más arriba, las aberturas de entrada y salida están colocadas en posición alternada.



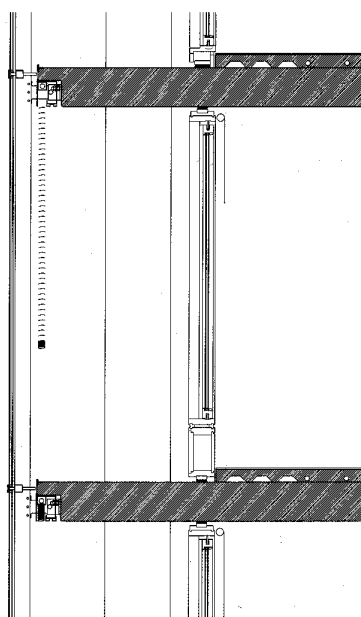
Edificio RWE AG de Ingenhoven, Overdiek, Kahlen & Partners en Essen, Alemania (1996, 163 m. de altura). Detalle de la fachada ³¹.

³¹ Briegleb Till (ed.). High Rise RWE AG Essen/ Ingenhoven Overdiek und Partner. Basilea: Birkhäuser Verlag, 2000. p 44.

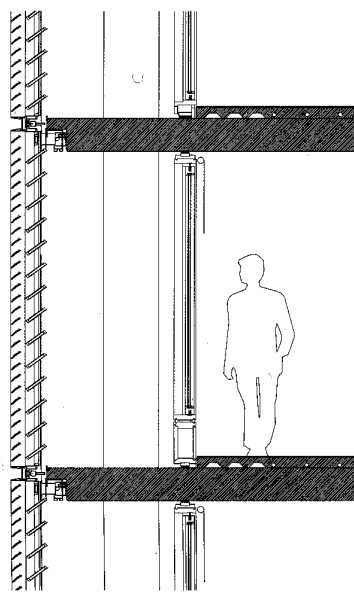
El edificio de oficinas DMAG en Hannover, de Thomas Herzog es otro referente de edificio en altura con doble piel de vidrio con cámara ventilada. Su funcionamiento se basa en los mismos principios que el edificio visto anteriormente. La principal diferencia entre ambos está en el mecanismo de entrada y salida de aire de la cámara: en el anterior todo el movimiento de aire se produce a través de la "boca de pez", mientras que en el edificio DMAG, éste se produce a través de rejillas que conforman módulos de fachada de suelo a techo.



Vista exterior del edificio DMAG (izquierda) y de la cámara de aire entre las dos fachadas (derecha)



Doppelfassade mit Festverglasung außen
Double-skin facade with fixed glazing externally



Doppelfassade mit Lüftungslamellen außen
Double-skin facade with ventilation flaps externally

Secciones de la fachada: doble vidrio con cámara (izquierda) y lamas de ventilación y vidrio interior (derecha). Fuente: Herzog ³²

³² Herzog, Thomas. *Architecture + Technology*. Ed. Prestel, Munich, 2001, p. 127.

Otros sistemas generadores de movimiento de aire son las fachadas de doble piel opaca con cámara de aire ventilada, conocidas habitualmente como fachadas trasventiladas. Están formadas por dos pieles opacas, una exterior y otra interior protegida con un aislamiento térmico en su cara externa; y una cámara de aire entre ellas. La fachada exterior tiene como misión impedir que el agua de lluvia y los rayos de sol incidan sobre la piel interior y a su vez favorecer la ventilación a través de sus juntas. Esta disposición protege a la piel interior de la radiación solar en verano y del viento en invierno. Las fachadas trasventiladas son un tema ampliamente estudiado en el que esta tesis no pretende profundizar.

Un buen ejemplo de rascacielos con fachada trasventilada es el edificio AT&T de Philip Johnson en Nueva York, ejecutado en su cara exterior con placas prefabricadas de grandes dimensiones de granito rosa.



Rascacielos AT&T de Philip Jonson, Nueva York, EE.UU, 1984.

A.2. Ventilación cruzada: El mecanismo de ventilación cruzada consiste en favorecer el movimiento del aire de un espacio o una sucesión de espacios asociados, gracias a la colocación de aberturas al exterior en dos fachadas opuestas. Es aconsejable en climas cálidos húmedos y en climas templados en verano, hasta el punto de constituir una de las diferencias características entre los climas nórdicos y los meridionales de Europa. Las aberturas se han de situar en fachadas que estén comunicadas con espacios exteriores con condiciones de radiación y exposición al viento muy diferentes.

El edificio del Commerzbank de Frankfurt (Norman Foster, 1997) es un paradigma de edificio en altura en el que se han incorporado estrategias de ventilación natural que permiten importantes ahorros energéticos en climatización, tanto en verano como en invierno. En este caso, se puede ventilar de forma natural el rascacielos hasta un 50% del año. Solamente en los días más calurosos de verano es necesario cerrar las ventanas y activar el sistema de aire acondicionado. El gasto energético en climatización en este tipo de edificios suele ser un 60% del consumo total de energía durante su vida útil ³³, por lo que el ahorro energético derivado de la ventilación podría llegar a ser de hasta un 30%.

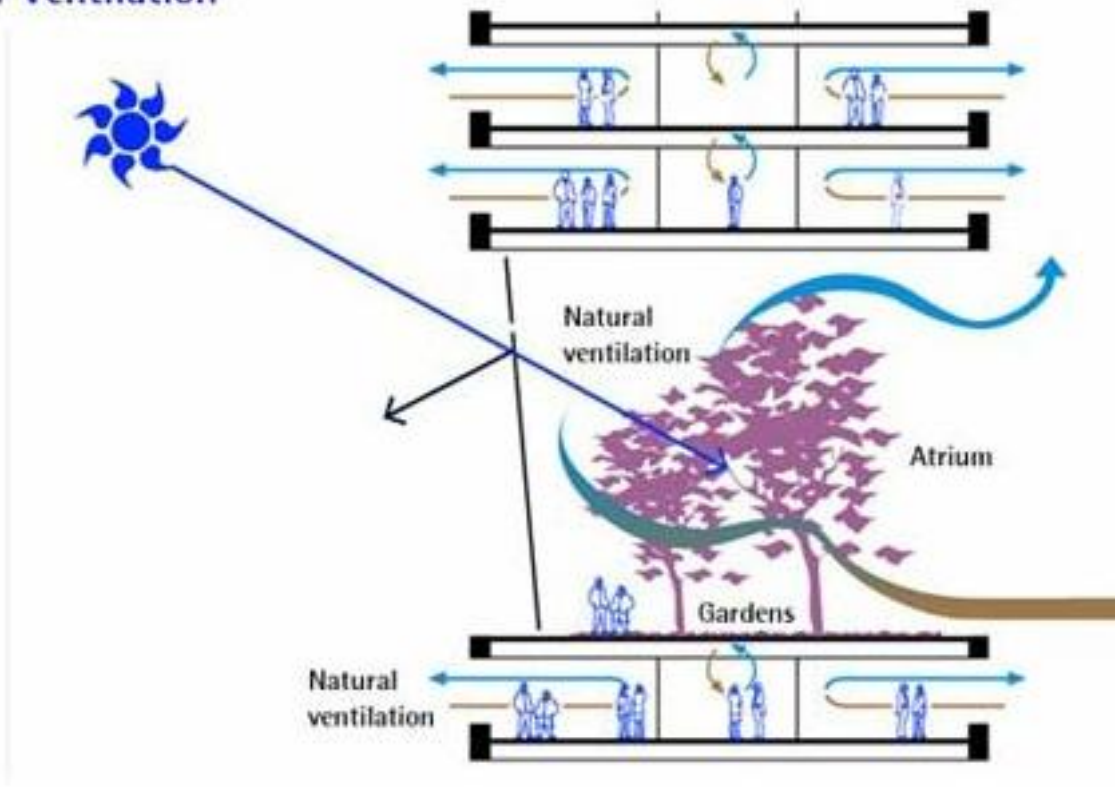


En el Commerzbank, las oficinas exteriores se ventilan naturalmente mediante la abertura de las ventanas situadas en la cara interior de la fachada exterior de doble vidrio con cámara, mientras que las oficinas interiores se ventilan a través de las ventanas que dan a los patios y jardines interiores situados a diversas alturas conectados con el exterior por medio de grandes ventanales.

Vista exterior del edificio Commerzbank.

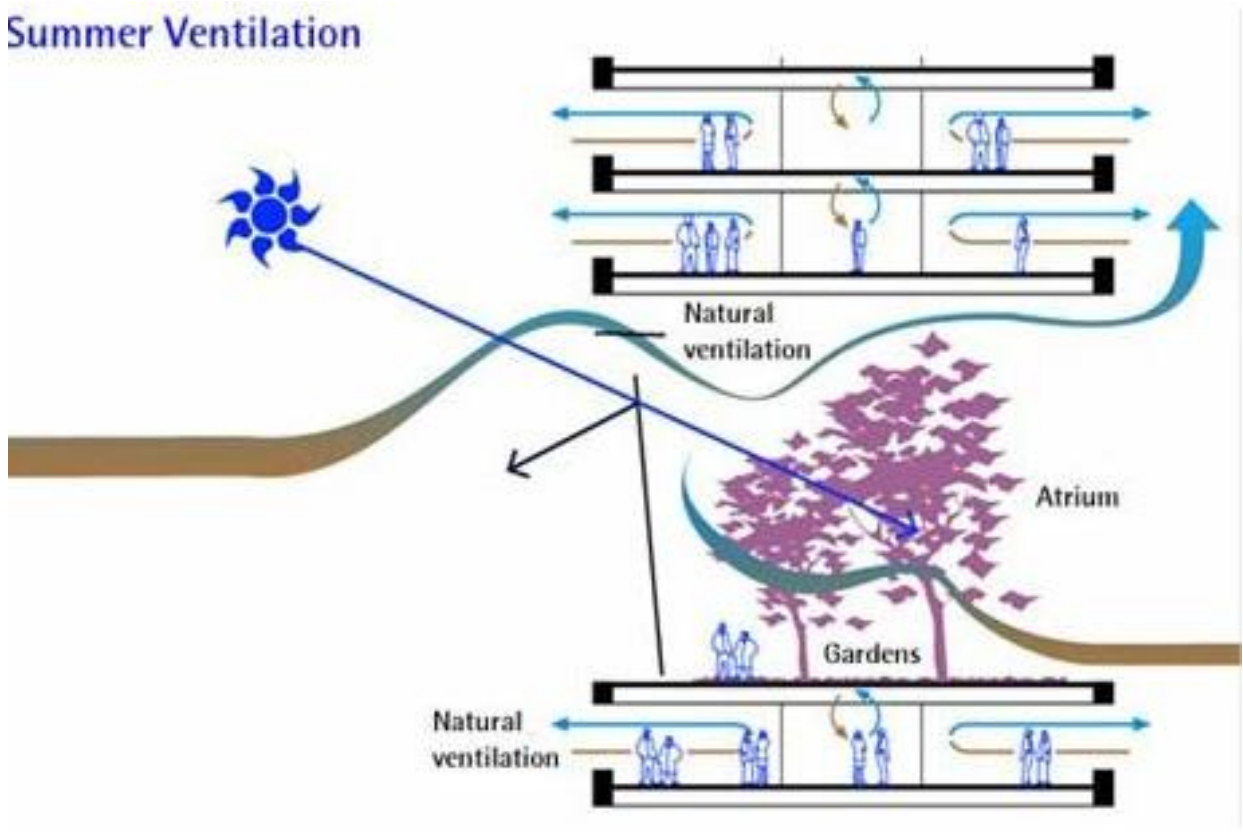
³³ Yeang, Ken. *El rascacielos ecológico*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2001, p. 198.

Winter Ventilation

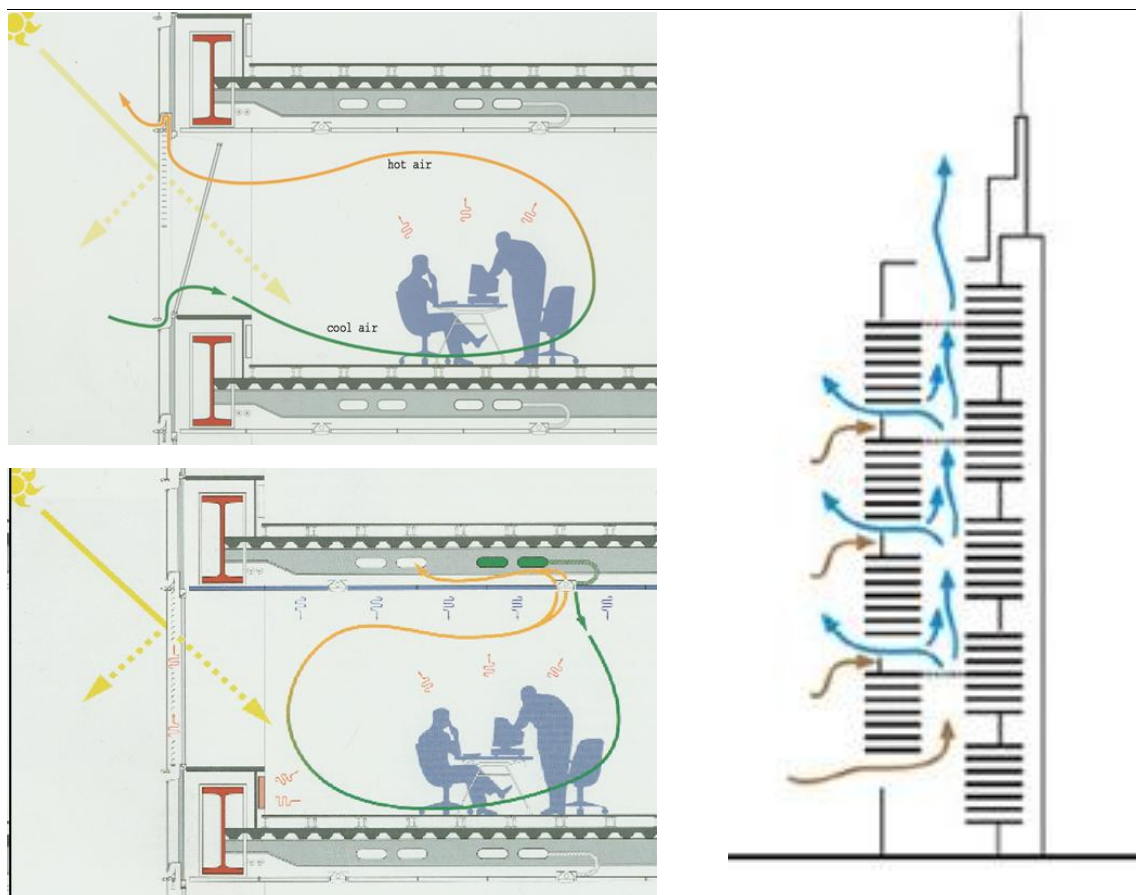


Ventilación cruzada en invierno del edificio Commerzbank de Norman Foster, Frankfurt, Alemania.

Summer Ventilation



Ventilación cruzada en verano del edificio Commerzbank de Norman Foster, Frankfurt, Alemania.



Commerzbank: Esquema de ventilación de las oficinas (izquierda). Ventilación del edificio por efecto chimenea (derecha).

A.3. Efecto chimenea: El efecto chimenea es otro sistema de movimiento de aire interior que se produce al crear una extracción de aire por unas aberturas que hay en la parte superior del espacio, conectadas a un conducto de extracción vertical. La diferencia de densidad del aire en función de la temperatura hace que el aire caliente (menos denso) salga por estas aberturas superiores. Para asegurar el buen funcionamiento del sistema, se ha de completar con aberturas inferiores para la entrada de aire más frío (más denso). Es un mecanismo especialmente eficaz en un edificio de altura, dado que la configuración vertical del mismo favorece el desplazamiento natural del aire.

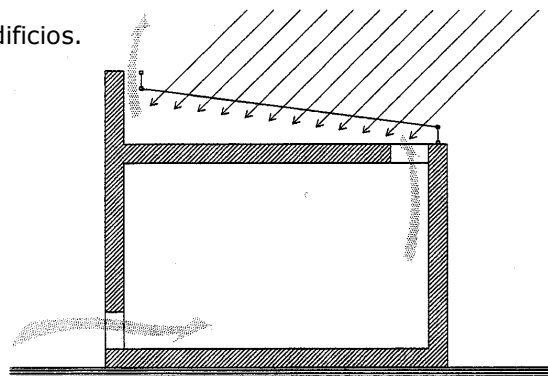
El mecanismo de efecto chimenea aplicado a un rascacielos lo encontramos también en el edificio Commerzbank, de Frankfurt. Emplea un sistema de ventilación natural potenciado por un conjunto de jardines colgantes desarrollados helicoidalmente a lo alto del edificio. Estos jardines ocupan cuatro niveles cada uno, y van rotando aprovechando la forma triangular de la planta, la cual asegura el correcto efecto del viento sobre todas ellas, ya sea por sobrepresión o por depresión. El eje central del edificio se corta horizontalmente cada doce plantas para evitar que el gran tiro que se podría establecer desequilibre la

ventilación de las oficinas. A cambio, se establecen tres pequeños conjuntos superpuestos, resolviendo cada uno de ellos sus necesidades de ventilación entre fachadas y con el jardín.

A.4. Chimenea solar o cámara solar: El sistema consiste en calentar aire dentro de una cámara con un captador de color oscuro protegido por una cubierta de vidrio. Al calentarse el aire, se produce el efecto de succión en las aberturas inferiores que están en contacto con el ambiente interior y la extracción del aire interior hacia el exterior por las salidas superiores. En el caso del edificio en altura, tenemos serias dudas de la eficacia de esta solución dada la pequeña dimensión de la cubierta en relación con el gran volumen de espacios interiores que hay en este tipo de edificios.

Esquema de una chimenea solar.

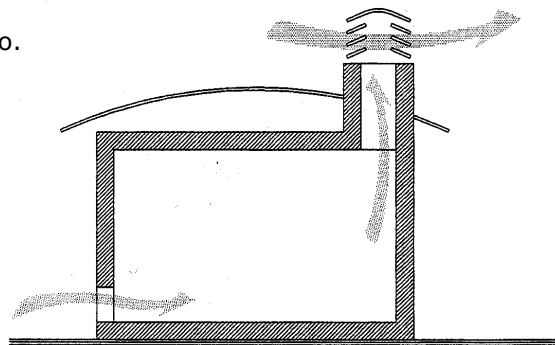
Fuente: Rafael Serra ³⁴.



A.5. Aspiradores estáticos: Generan una depresión en el aire interior del edificio debido a la aspiración producida por un dispositivo estático situado en la cubierta. Para que el dispositivo funcione, se ha de producir el efecto Ventury, que es el que realmente crea la aspiración. Para que este sistema funcione, se ha de completar con una entrada de aire situada en la parte inferior del circuito.

Esquema de un aspirador estático.

Fuente: Rafael Serra ³⁵.



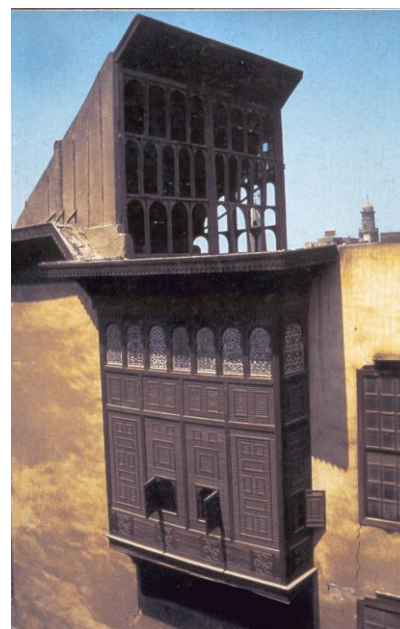
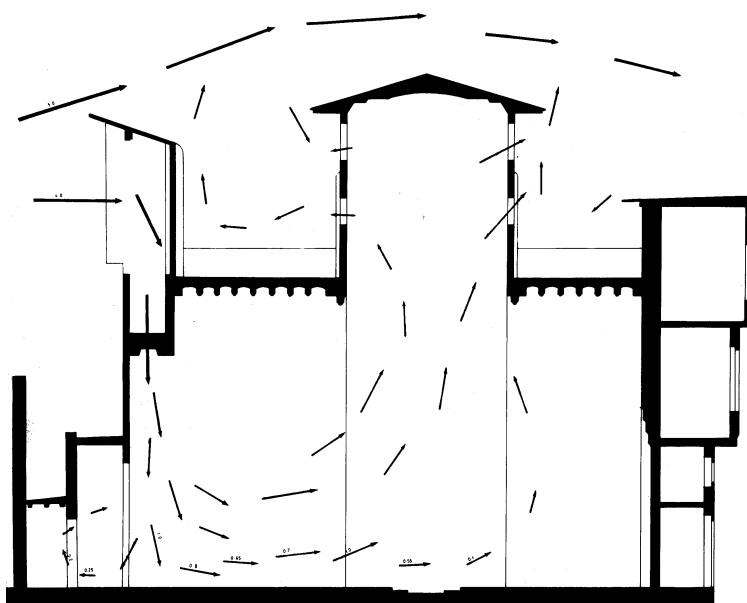
Otros mecanismos que se basan en los mismos principios que los aspiradores estáticos, son los aspiradores dinámicos, con la única diferencia que éstos últimos disponen de un extractor móvil generalmente metálico, empujado por el viento (pasivo) o por un motor eléctrico (activo).

³⁴ Serra, Rafael. *El disseny energètic a l'arquitectura*. Ed. UPC, 3ª ed. Barcelona, 1999, p.99.

³⁵ *Ibidem*, p.100.

En el caso del edificio en altura, tenemos serias dudas de la eficacia de ambas soluciones, dada la elevada cantidad de extractores que habría que colocar para dar respuesta al gran volumen de espacios interiores que hay en este tipo de edificios.

A.6. Torres de viento: Otros sistemas generadores de movimiento de aire son las torres de viento. Su funcionamiento es el siguiente: se introduce aire exterior en el interior mediante una torre que se eleva hasta una altura suficiente por encima de la cubierta del edificio y ahí donde el viento es más intenso lo recoge. El aire así captado se conduce hasta la parte baja de los locales por conductos. En zonas donde la dirección del viento es constante, la abertura es única y está orientada hacia esa dirección. Cuando hay diferentes direcciones dominantes, se combinan diferentes entradas de aire en la parte superior de la torre. Un referente de torre de viento lo tenemos en la arquitectura popular egipcia:



(Izquierda): Estudio del movimiento del aire a través de una torre de viento (malkaf). Bayt Kathoda (Mohib al-Din). El aire entra a través del malkaf y refresca el espacio interior. El aire más caliente sube y se dispersa a través de la linterna (shukshaykha). Hassan Fathy³⁶.

(Derecha): Torre de viento y vista exterior de un enrejado de madera egípcio (masrabiya) en El Cairo. Hassan Fathy³⁷. La torre de viento (*malkaf*) y el enrejado de madera (*mashrabiya*) permiten la circulación efectiva del aire fresco. La torre de viento (*malkaf*) y el enrejado de madera (*mashrabiya*) permiten la circulación efectiva del aire fresco.

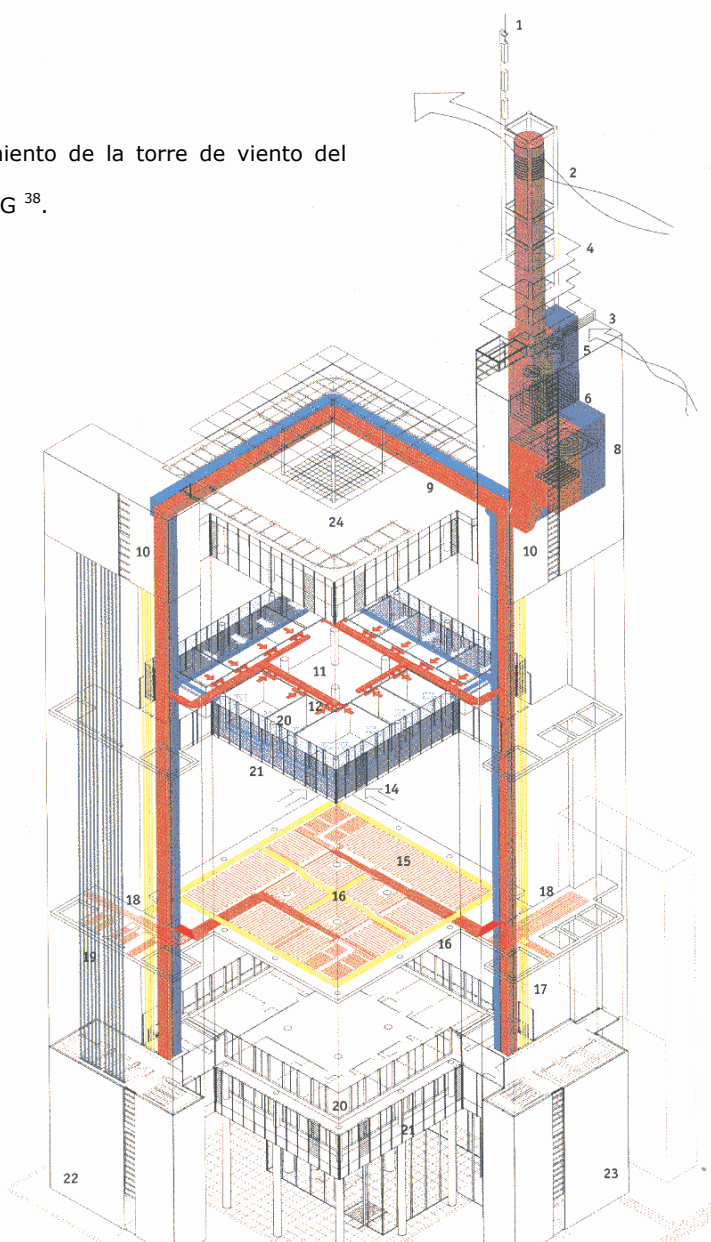
³⁶ Steele, James. *An architecture for people: the complete Works of Hassan Fathy*. Ed. Thames and Hudson, London, 1997, p.176.

³⁷ *Ibidem*, p.18.

El edificio de oficinas DMAG en Hannover, de Thomas Herzog, es un ejemplo de edificio en altura en el que se ha aplicado además de los mecanismos pasivos vistos anteriormente, el principio pasivo de ventilación mediante una torre de viento.

Cuando las ventanas de las oficinas están cerradas, el aire interior viciado se extrae a través de rejillas situadas en el techo y se canaliza verticalmente a través de un sistema de conducción central hasta una unidad de intercambio de calor giratoria situada encima de la cubierta del edificio gracias a una torre de viento a una altura de 30 metros por encima del núcleo de acceso a la cubierta, por efecto Ventury. En invierno, esto permite que el 85% de la energía térmica contenida en el aire extraído se use para precalentar el aire fresco que se toma del exterior, lo que reduce considerablemente el gasto en calefacción del edificio.

Esquema de funcionamiento de la torre de viento del edificio de oficinas DMAG ³⁸.



³⁸ Herzog, Thomas. *Architecture + Technology*. Ed. Prestel, Munich, 2001, p. 126.

B- Sistemas de tratamiento del aire: Son componentes del edificio que hacen que un determinado caudal de aire al ponerse en contacto con unas superficies, mejoren sus condiciones iniciales de humedad y temperatura. A continuación veremos los diferentes sistemas:

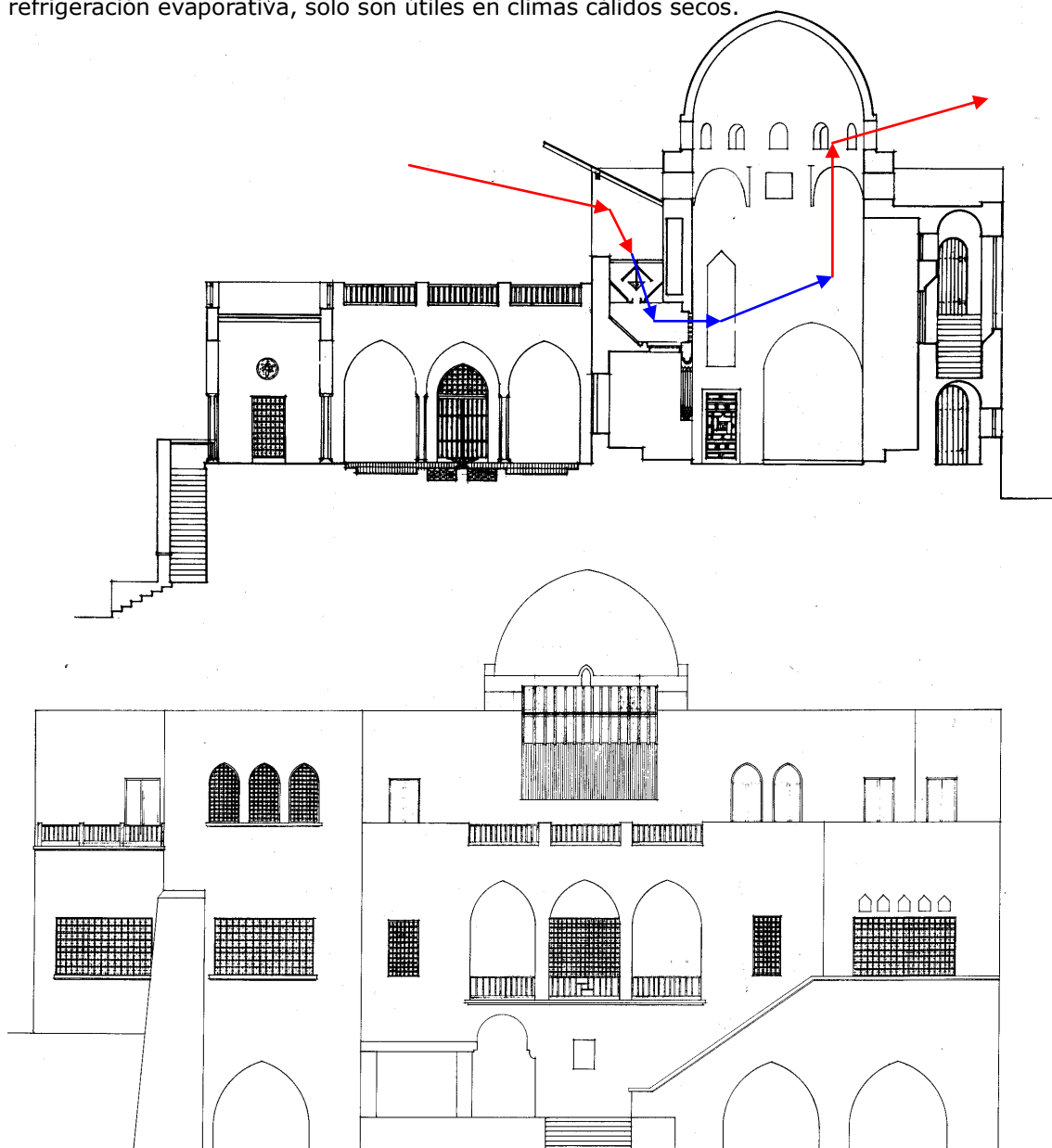
B.1 Refrigeración evaporativa: Este sistema favorece la evaporación del agua por la acción de una corriente de aire que pasa por encima de su superficie. El efecto de refrigeración evaporativa se basa en el principio que un líquido como el agua, al evaporarse necesita energía para pasar de su estado líquido a gas, y esta energía la coge del aire con el que está en contacto. Este método funciona mejor en climas cálidos secos.



Refrigeración evaporativa del agua del estanque en la Alhambra de Granada

Su aplicación en edificios en altura, combinado con sistemas de ventilación natural puede aportar importantes reducciones energéticas de refrigeración en verano en un clima cálido seco como es el de Madrid.

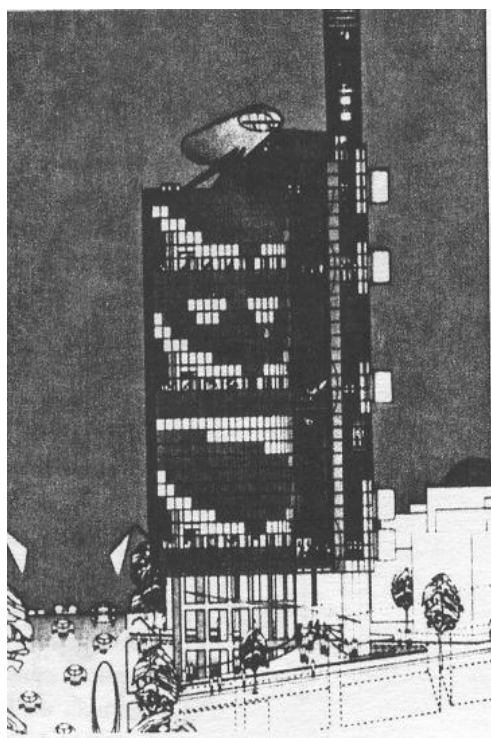
B.2 Torres evaporativas: Este sistema funciona de la siguiente forma: el aire que entra por la parte superior de una torre se enfría por la evaporación del agua que humedece las paredes de su interior. Este aire, enfriado (más pesado) tiende a caer y entra al interior por la parte baja de la torre. Este sistema se debe complementar con otros de extracción del aire para que funcione. Como todos los sistemas basados en la refrigeración evaporativa, solo son útiles en climas cálidos secos.



Diseño preliminar de la casa Hamdí Seif-al-Nasr en Fayyum, de Hassan Fathy ³⁹. Ejemplo de torre evaporativa. Se capta una corriente de aire por la torre y se hace pasar a través de una lámina enfriada (*salsabil*) humedecida por un chorrillo constante de agua que cae desde una loza de barro llena de agua suspendida encima de ésta.

³⁹ Steele, James. *An architecture for people: the complete Works of Hassan Fathy*. Ed. Thames and Hudson, London, 1997, p.45.

El edificio Torre Turbina de Richard Rogers ⁴⁰ es un buen ejemplo de la aplicación de una torre evaporativa en un rascacielos. El edificio, construido en Tokio, cuenta con un sistema de torres de viento de captación y extracción de aire. El viento se capta por medio de una torre inferior y se canaliza hacia unos intercambiadores de calor en cisternas de agua fría. El aire, una vez climatizado, se introduce en los locales del edificio. El aire caliente del interior se canaliza a una gran torre de succión, que aprovecha el efecto stack (efecto de tiro), que se incrementa por captadores solares en lo alto de la torre.



Edificio Torre Turbina, Richard Rogers.

B.3 El patio: El mecanismo en que se basa el patio parece muy sencillo pero es bastante complejo, por el hecho que intervienen muchos fenómenos a la vez. El efecto ambiental consiste en crear un microclima controlado, que actúa como filtro entre las condiciones exteriores y las interiores. No solo mejora las condiciones térmicas (temperatura y humedad) sino también las lumínicas y acústicas. Favorece la ventilación natural aportando aire más fresco en verano y más cálido en invierno. Si hay una fuente de agua en el patio, bajará la temperatura del aire por efecto evaporativo y actuará sobre la humedad del aire del patio. La posible existencia de vegetación también

⁴⁰ Rodríguez Viqueira, Manuel. *Introducción a la arquitectura bioclimática*. Ed. Universidad Autónoma Metropolitana. México, 2001, p.112.

aportará humedad al aire. La protección de la radiación directa del sol ayuda a mantener baja la temperatura del aire del espacio en sombra.



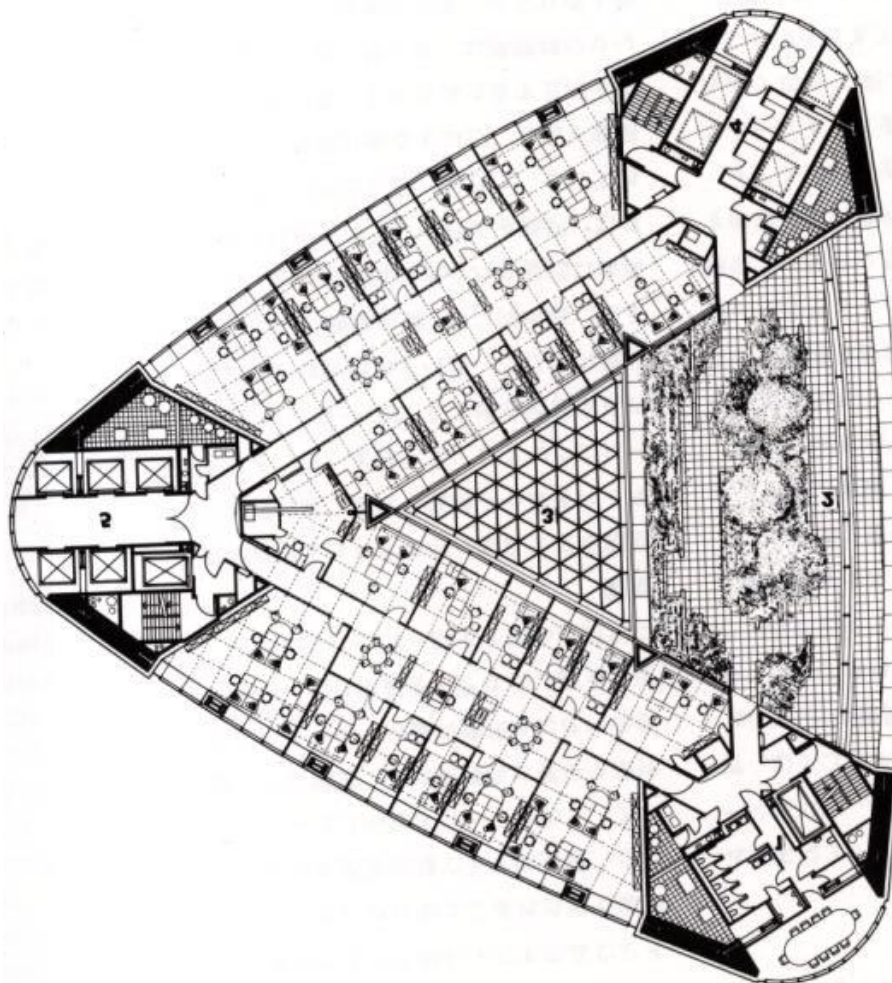
Un ejemplo de patio en la arquitectura tradicional: patio de los Leones en la Alhambra de Granada.



Ejemplo de patio aplicado en un rascacielos. Los patios ajardinados crean un microclima que permite a las oficinas del rascacielos respirar de forma natural a través del patio con el exterior.

Los patios están a su vez conectados formando una espiral a lo largo de la fachada del edificio.

Rascacielos Commerzbank de Frankfurt, Alemania. Norman Foster.



B.4 Ventilación subterránea: Es un sistema de tratamiento del aire que consiste en favorecer la entrada de aire proveniente de conductos enterrados que llevan un aire exterior, en determinadas condiciones, al interior. En la mayoría de casos también aprovecha la inercia del terreno para suministrar aire frío en épocas cálidas, mediante un sistema de conductos subterráneos, por donde pasa el aire antes de entrar en el edificio. Es un sistema adecuado en climas con grandes oscilaciones térmicas, como puede ser Madrid. Los conductos que están a gran profundidad en el terreno (6 y 12 metros), pueden llegar a encontrar una masa térmica a temperatura constante todo el año. En este caso, la temperatura del terreno siempre tendrá unas condiciones favorables, ya que en verano el terreno estará más fresco que el aire exterior y en invierno más caliente.

- 5.1.4.1.3 SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE LA RADIACIÓN: Son todos los elementos, componentes o conjuntos de componentes que protegen la piel de los edificios contra el exceso de radiación solar. Se pueden dividir en tres grandes grupos:

1- PROTECCIONES DE LOS HUECOS:

El primer mecanismo pasivo de protección de la radiación consiste en la protección de los huecos. A su vez se clasifican en:

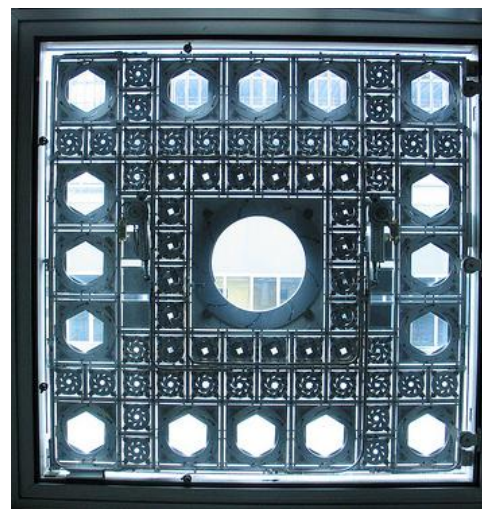
- Según su movilidad:

- Fijas:



Protecciones solares fijas en el MACBA, Barcelona. Richard Meier y Fernando Ramos.

- Móviles: Permiten ajustarse para adaptarse a las condiciones exteriores y aprovechar al máximo el sol, proporcionando protección contra el deslumbramiento y las ganancias solares excesivas. En invierno, en las zonas templadas, si se cierran, permiten reducir las pérdidas caloríficas del edificio por radiación hacia el exterior.



Protecciones solares móviles en la fachada del Instituto del mundo árabe en París. Jean Nouvel.

- Según su localización respecto a los cerramientos:

- Exteriores: Cuanto más exterior sea la protección mejor funcionará en verano, puesto que el elemento protector siempre absorbe algo de calor y se convierte en un radiador. Los únicos inconvenientes derivan de la dificultad de su manipulación y los problemas de mantenimiento por su exposición a la intemperie.



Protecciones exteriores mediante brise-soleils en el rascacielos del barrio de la Marina en Argel. Le Corbusier. 1938-42. Fuente: Boesiger ⁴¹.

- Interiores: Tienen la ventaja de un fácil mantenimiento y la desventaja de que no son tan efectivos como el sistema anterior, particularmente en verano. Cuando se emplean protecciones interiores se produce una reducción de la radiación solar directa que incide sobre los paramentos interiores, pero no se evita que la radiación haya atravesado ya el vidrio, produciéndose de esta forma el efecto invernadero.

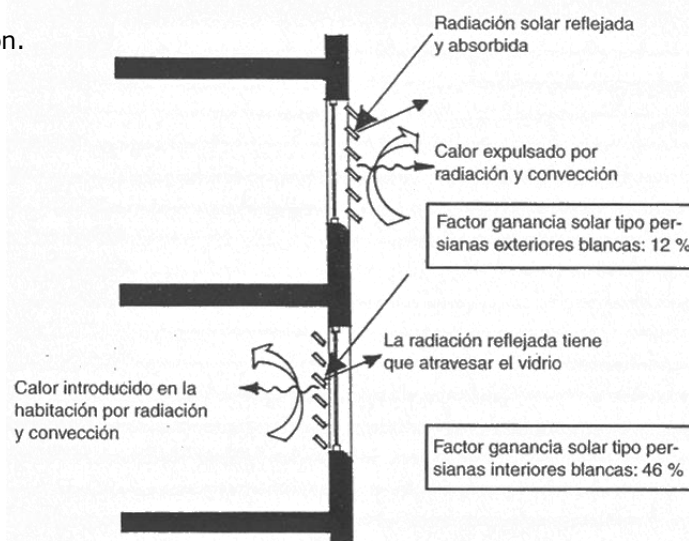


Protecciones interiores en rascacielos de oficinas

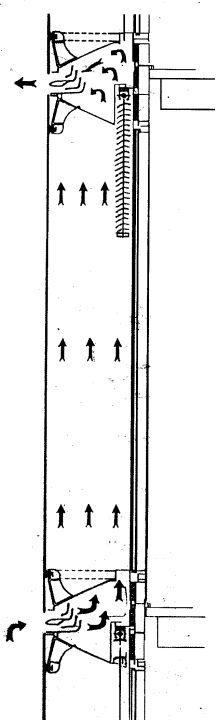
⁴¹ Boesiger, Willy. *Le Corbusier, 1910-65*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1971, p.125.

A continuación vemos un gráfico con los distintos factores de ganancia solar según la localización de la protección del sol. El factor de protección solar es la relación entre la energía que incide sobre un acristalamiento una vez atravesada la protección y la que incidiría si no existiera tal protección.

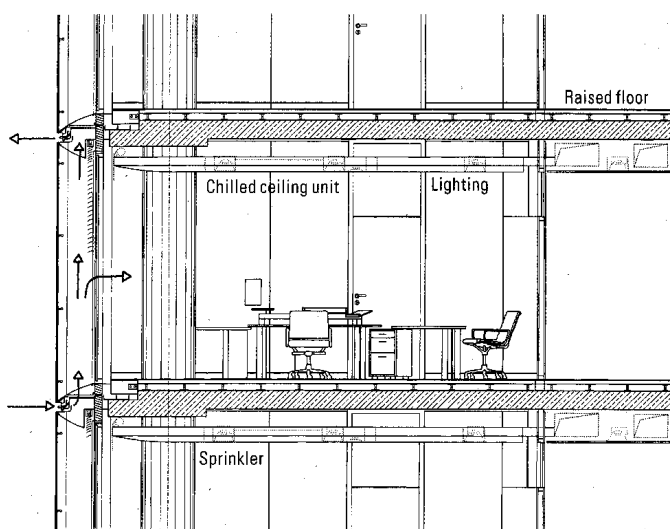
Protección de las ventanas mediante persianas interiores y exteriores. Gráfico extraído de Ken Yeang ⁴². Fuente: Baker 1992 ⁴³.



- **Interpuestas:** La protección se sitúa entre dos vidrios, con la desventaja del mayor coste de los dos vidrios, pero con la ventaja del fácil mantenimiento y buena protección solar. Es aún mejor si se puede controlar el movimiento de aire en esa cámara, de forma que mediante elementos practicables en la carpintería podamos, en verano evacuar el aire al exterior y aprovecharlo en invierno hacia el interior.



Ejemplo de protección solar interpuesta entre las dos hojas del edificio RWE AG de Ingenhoven, Overdiek, Kahlen & Partners en Essen, Alemania. 1991-1996.



⁴² Yeang, Ken. *El rascacielos ecológico*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2001, p. 219.

⁴³ Baker, N.V., *Energy and Environment in Non-Domestic Buildings: A Technical Guide*. Cambridge University Press con Cambridge Architectural Research Ltd. y The Martin Centre for Architectural and Urban Studies, Cambridge, 1992.

-Según el aislamiento térmico que aporten: (En este apartado, seguimos la clasificación hecha por Neila ⁴⁴)

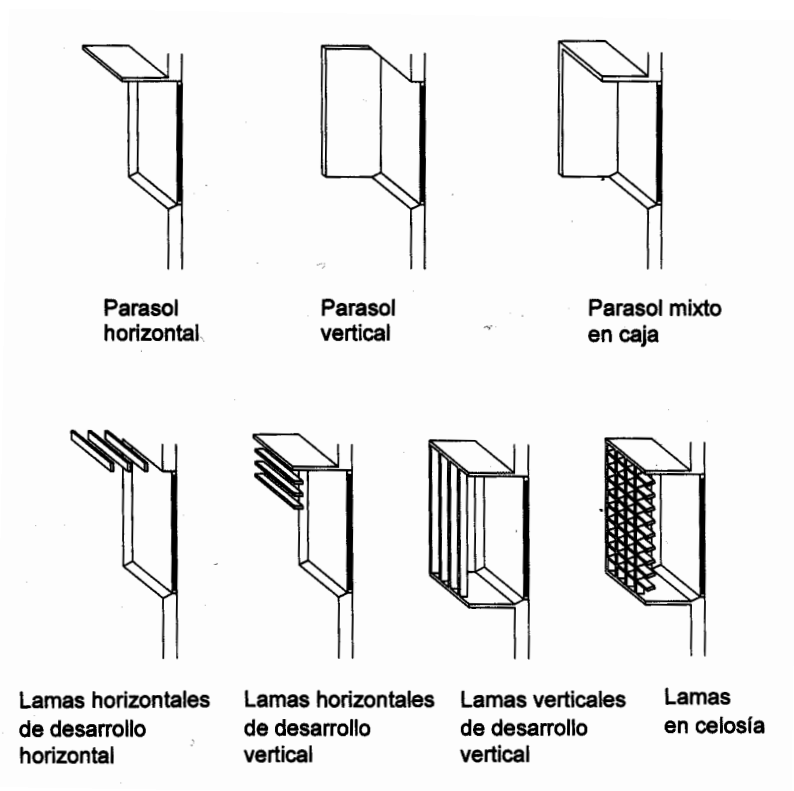
- Protecciones exclusivamente de la radiación solar (PERS): Estos dispositivos se llaman también parasoles. Su función es únicamente la de dar sombra al hueco acristalado. Estos se clasifican en fijos y móviles, dando lugar a los diferentes modelos:

- PERS Fijos:

- Parasoles horizontales sobre dintel.
- Lamas de desarrollo horizontal.
- Parasoles verticales al lado de las jambas.
- Lamas horizontales de desarrollo vertical.
- Lamas verticales de desarrollo vertical.
- Parasoles mixtos en caja.
- Lamas mixtas en celosía.

- PERS Móviles:

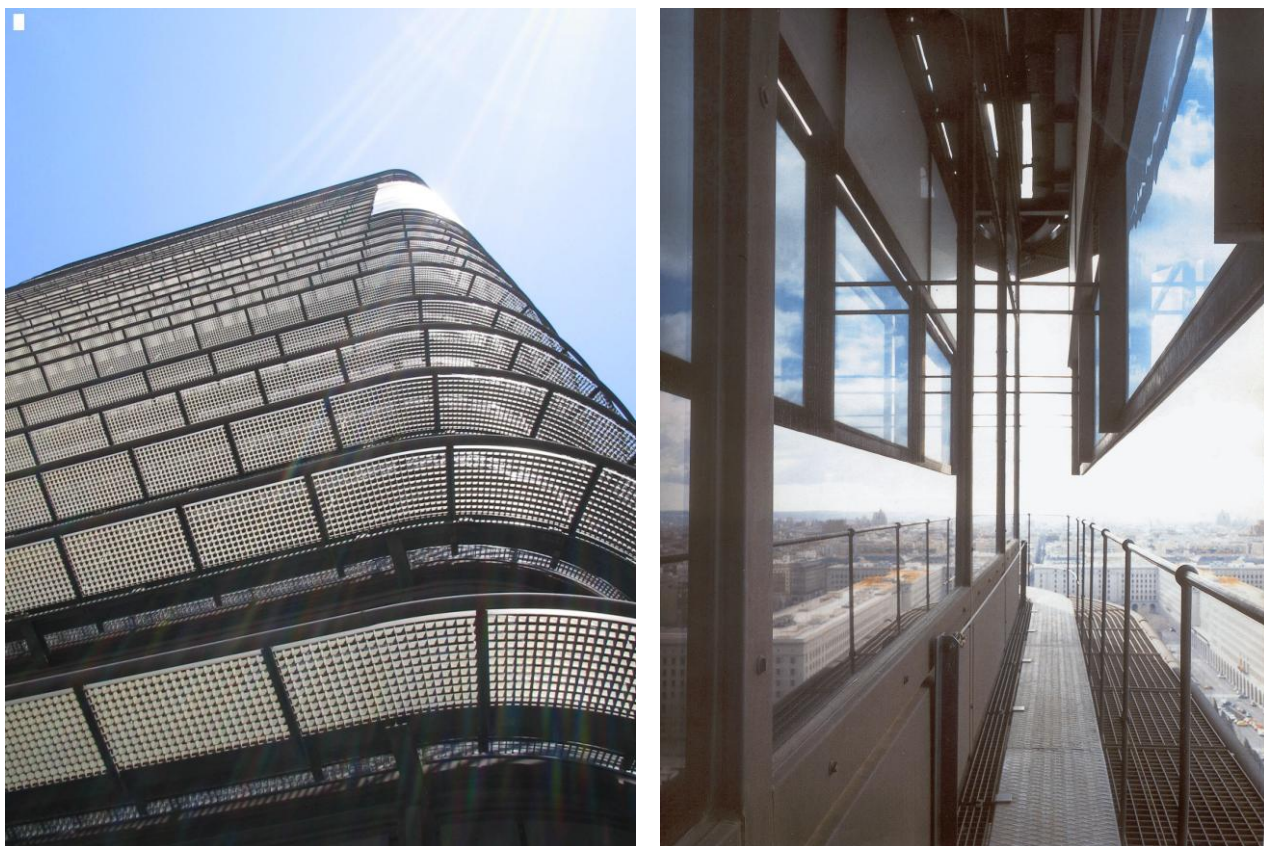
- Lamas horizontales de desarrollo vertical.
- Lamas verticales de desarrollo vertical.



Dibujo de los diferentes tipos de apantallamientos, verticales y horizontales. Fuente: Neila ⁴⁵.

⁴⁴ Neila, F.J. *Arquitectura Bioclimática en un entorno sostenible*. Ed. Munilla-Lería, Madrid, 2004, p.291.

⁴⁵ *Ibidem*, p.291.



Ejemplos de protecciones solares: brise-soleil (izquierda) en la fachada sur y vidrios verticales en la fachada oeste (derecha) del edificio BBVA de F.J. Saénz de Oíza, Madrid.

- Protecciones de la radiación solar y de la transmisión del calor (PRSTC): Estos elementos tienen una doble función: por un lado, interceptan la radiación solar que llega a las superficies acristaladas, con la consiguiente reducción de la carga solar y por otro lado, reducen la transmisión de calor a través del acristalamiento, por el mayor aislamiento térmico que le dan al hueco. Las protecciones a la transmisión de calor se desarrollan en paralelo al vidrio y a poca distancia para crear una cámara de aire entre ambos que aporte su resistencia térmica; son las cortinas, persianas, visillos, contraventanas, etc. Se pueden clasificar en:
 - PRSTC exteriores:
 - Persianas
 - Contraventana
 - PRSTC interiores:
 - Cortinajes
 - Persiana veneciana

2- PROTECCIONES DE LA ENVOLVENTE:

El segundo mecanismo pasivo de protección de la radiación consiste en la protección de la envolvente. Existen dos formas de proteger la envolvente: mediante una 2ª piel y una cámara ventilada (este tema ya se ha tratado anteriormente) o mediante la cobertura con vegetación. Estas protecciones se pueden aplicar tanto en fachada como en cubierta.

- 2.1. VEGETACIÓN Y JARDINERÍA VERTICAL EN FACHADAS: La integración de vegetación en la fachada del rascacielos es un mecanismo pasivo de protección de la radiación, ya que obstruye, absorbe y refleja un alto porcentaje de la radiación solar que le llega, proporcionando sombras a los espacios interiores y a las paredes exteriores, con lo que se reduce la ganancia de calor en verano en el interior del edificio.



Propuesta de colonización con vegetación vertical en las fachadas del rascacielos.

* Beneficios medioambientales: De la aplicación de fachadas vegetales en el edificio en altura se derivan las siguientes mejoras medioambientales:

1. Aumento del aislamiento térmico del edificio con el consiguiente ahorro de energía en climatización. Según Ken Yeang ⁴⁶, la envoltura vegetal en las fachadas expuestas mejora la eficacia energética de los muros en una proporción de hasta un 8%, en parte por las bolsas de aire en reposo que se forman (ejercen un efecto de aislamiento térmico parecido al de una cámara de aire) y en parte porque evita que el agua de lluvia rellene de agua los intersticios de aire existentes en la pared (una pared húmeda se comporta peor como aislante que

⁴⁶ Yeang, Ken. *El rascacielos ecológico*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2001, p. 237.

una seca). Según M. Hough ⁴⁷ el ajardinamiento de la fachada puede reducir las pérdidas caloríficas del edificio en invierno en un 30%.

2. Mejora del microclima urbano y disminución del efecto de isla de calor en el centro de las ciudades. Según M. Hough ⁴⁸, el ajardinamiento de la fachada puede rebajar la temperatura ambiente a nivel de la calle en unos 5°C en verano en latitudes de clima templado como las de Barcelona y Madrid, ayudando a mitigar el efecto de isla de calor de las ciudades. La evaporación de agua que se produce en los procesos de evapotranspiración de las plantas afecta al microclima en la zona de la fachada y puede aprovecharse como un medio natural eficaz de enfriamiento. De hecho, gracias a este proceso, las hojas de las plantas pueden tener una temperatura inferior en 1°C a la temperatura ambiente.
3. Absorción del ruido del tráfico y el proveniente de otras fuentes. La mitigación del nivel de ruido por parte de la vegetación depende de las características, estructura y densidad de la vegetación plantada. Según Posada et Al. ⁴⁹, para conseguir una mitigación considerable del nivel de ruido por parte de la vegetación, es necesario el uso de barreras vegetales heterogéneas de por lo menos 20 m. de anchura y 14 m. de altura, tupidas, con hojas anchas, densas y perennes situadas cerca de la fuente de emisión de ruido. Todas estas exigencias las cumple sobradamente el edificio en altura, por sus dimensiones y emplazamiento urbano. Por todo ello, el rascacielos revestido de vegetación en sus fachadas puede ser una herramienta para la mejora de la calidad ambiental acústica en las ciudades.
4. Absorción del agua de lluvia después de fuertes precipitaciones. De esta forma disminuye el riesgo de inundaciones y riadas provocadas por las fuertes lluvias.
5. Disminución de la contaminación atmosférica. La vegetación presente en las fachadas de los edificios en altura puede mitigar la contaminación producida en las ciudades gracias a la fijación de partículas de polvo y gases contaminantes que se encuentran en suspensión en la atmósfera.

⁴⁷ Hough, M., *Naturaleza y ciudad*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1998.

⁴⁸ Hough, M., *Naturaleza y ciudad*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1998.

⁴⁹ [Posada et Al.], Martha Isabel Posada, María de Pilar Arroyave, Carlos Fernández, “Influencia de la vegetación en los niveles de ruido urbano”, en *Revista EIA*, diciembre de 2009, p.79-89.

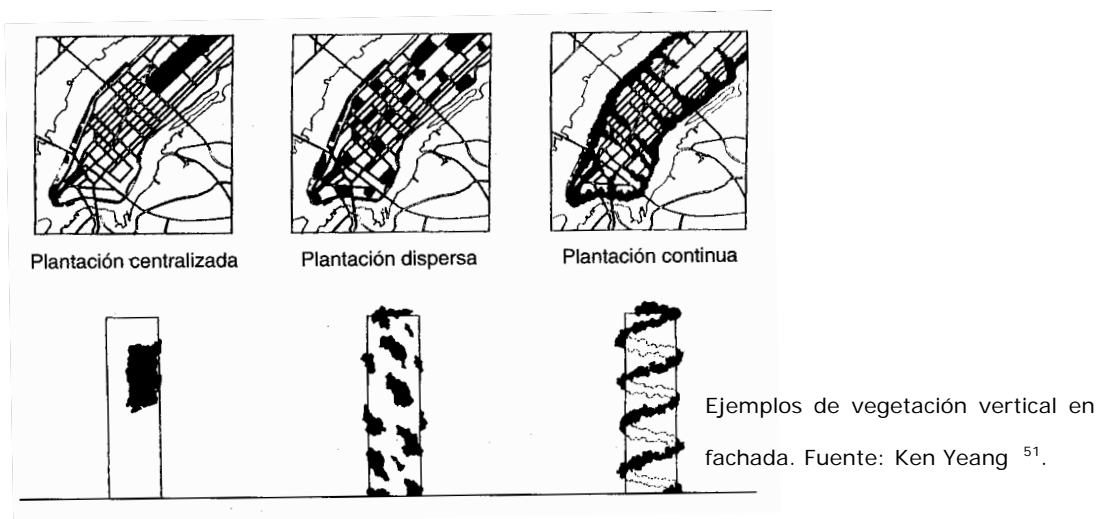
6. Aumento de la biodiversidad. Los muros verdes ayudan a aumentar la biodiversidad, aunque también pueden generar problemas con insectos y ratones.
7. Mejora del aspecto visual de fachadas poco atractivas o monótonas.

*Posibles daños ocasionados por la vegetación en las fachadas: Es importante tener en cuenta que la plantación de vegetación, si no se toman las precauciones necesarias, puede ocasionar daños en la fachada de un edificio. Entre los daños más habituales están las raíces que atraviesan impermeabilizaciones y penetran en las juntas de las fachadas, zarcillos que fuerzan su paso a través de capas de revestimiento y marcos de ventanas, hojas y ramitas que bloquean bajantes de pluviales o el exceso de peso de algunas plantaciones que puede tener un efecto negativo sobre el equilibrio estructural de la fachada del edificio.

Para evitar éstas y otras lesiones derivadas de la construcción vegetal en las fachadas conviene seguir las pautas redactadas para las diversas formas de muro verde, que pueden encontrarse en la directriz FLL para la planificación, construcción y mantenimiento de fachadas vegetales ⁵⁰.

* Formas de implantación: Existen tres estrategias básicas para incorporar la vegetación en la fachada de los rascacielos:

- **Concentración o centralización:** Consiste en plantar vegetación de forma concentrada o centralizada.
- **Dispersión:** Consiste en plantar vegetación de forma dispersa.
- **Continuación:** Consiste en plantar vegetación de forma continua.



⁵⁰ www.f-l-l.de

⁵¹ Yeang, Ken. *El rascacielos ecológico*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2001, p. 238.



Ejemplos de proyectos de rascacielos con vegetación en la fachada. G-Tower, en Shenzhen, China (izquierda) y L Tower, en Kuala Lumpur, Malasia (derecha), ambos de Ken Yeang. ⁵²

⁵² Yeang, Ken. *Eco Skyscrapers Vol. 2*. Ed. Images Publishing, Mulgrave, 2011, pp. 76, 150

* Tipos de fachadas vegetales:

-1. Plantación puntual:

-1.1 Trepadoras por adherencia: En el Mediterráneo es una práctica habitual desde hace mucho tiempo el uso de trepadoras como parras o frutales que suben por adherencia por las paredes de las viviendas. Este tipo de plantas que crecen desde el suelo tienen una altura limitada, por lo que su aplicación al edificio en altura se limitaría a sus plantas inferiores.



Fachada vegetal con trepadoras por adherencia.

-1.2 Trepadoras por guías: Se diferencian de las anteriores en que el soporte que utilizan para crecer está hecho de guías.



Fachada vegetal con trepadoras por guías metálicas en la residencia de estudiantes en Garching, Alemania, de los arquitectos Fink+Jocher.

-1.3 Plantas de balcón: Son contenedores de plantas situadas en determinados puntos de la fachada del edificio. Pueden llevar asociado un sistema de irrigación. Estos sistemas tienen el inconveniente del enorme peso y espesor constructivo que se deriva de la tierra empapada con agua, lo que las hacen menos adecuadas para colgarlas de muros como los de un edificio en altura. Además se requiere un gran consumo de agua, ya que la humedad debe llegar a toda la tierra para poder alcanzar las raíces.



Fachada vegetal con plantas de balcón en el edificio de viviendas Flower Tower en París, de Edouard François.



Fachada vegetal con plantas de balcón en el edificio de viviendas del arquitecto Fernando Higueras, Plaza de San Bernardo, Madrid. (Foto del autor).

-2. Plantación superficial (Muros vivientes): Son revestimientos vegetales de fachada integrados en sistemas de fachadas ventiladas. Tienen diversos nombres: Vertical Garden (jardín vertical), Living Wall (muro viviente), Plantwall (muro vegetal) y Wonderwall (muro maravilloso). Estos sistemas sí permiten alcanzar alturas como las de un rascacielos, puesto que no crecen hacia arriba, sino horizontalmente, de la fachada hacia fuera. Dentro de este grupo hay dos tipos de cultivos:

-2.1 Sistemas hidropónicos: los nutrientes se disuelven en agua, alimentando directamente a las raíces. De este modo, se elimina la necesidad de un sustrato de tierra. En realidad, las plantas no necesitan tierra para su crecimiento sino CO₂ y agua enriquecida adecuadamente con nutrientes que llegue a sus raíces. En estos sistemas, las plantas deben colocarse en un soporte que puede ser una bolsa de fieltro o planchas de espuma. Las raíces se extienden rápidamente de forma radial en el soporte pudiendo después de varios años soportar un crecimiento de hasta 6 metros de altura. Las plantas se riegan y alimentan de nutrientes regularmente (0,1g/l) mediante tubos horizontales de polipropileno a lo largo de la capa exterior del soporte en el borde superior de la fachada.

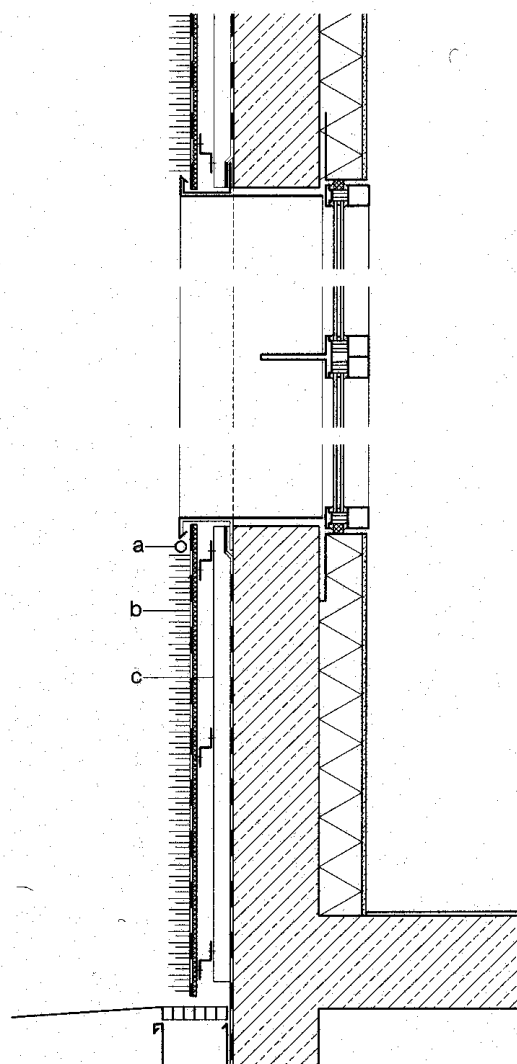


Fachada vegetal con sistema hidropónico en una medianera situada junto al edificio Caixaforum de Madrid, de Herzog & De Meuron. (Foto del autor).

Composición constructiva estándar:

- fachada exterior, con una capa impermeable.
- Estructura portante anti-corrosión (por ejemplo, de acero inoxidable) de 80 mm. que permita la ventilación.
- Lámina impermeable resistente a las raíces, de PVC expandido de 10 mm. de espesor en la base.
- Refuerzo de película de polipropileno.
- Dos capas de sustrato de de fieltro de poliamida de 3 mm. de espesor sujetas con grapas de acero fino.
- Plantas vegetales en bolsas de fieltro.
- Riego con tubos de poliuretano flexibles con agujeros de 2 mm. de diámetro y a una distancia de 100 mm.

- | | | |
|---|--|-------------------------------|
| a | Irrigación: sistema de tubos perforados de poliuretano | Lámina de polipropileno |
| b | Plantas en bolsas de fieltro | Soporte de PVC 10 mm |
| | Fieltro 2x3 mm | c Subestructura trasventilada |



Esquema de un muro vegetal hidropónico

Presenta diversas ventajas respecto a los sistemas tradicionales de ajardinamiento:

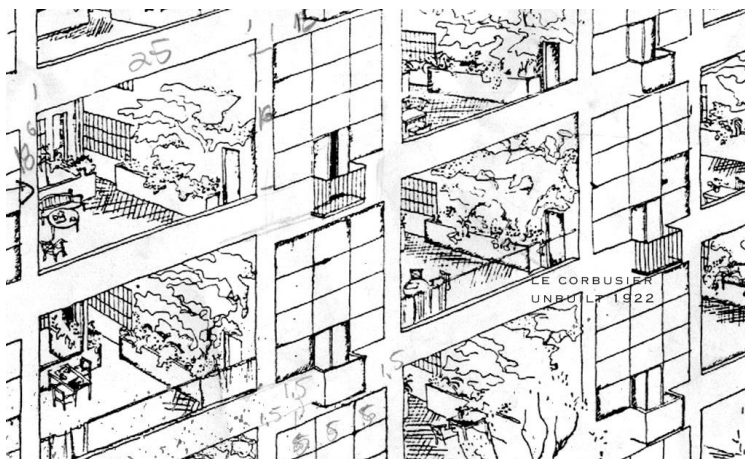
- distribuye regularmente la humedad sobre toda la superficie de la fachada, aprovechando la fuerza de la gravedad. Horizontalmente es más difícil de distribuir de una forma homogénea.
- tiene una mayor retención de la humedad que un sistema horizontal, dado que su colocación vertical dificulta la evaporación del agua suministrada.
- reduce considerablemente el peso de la solución, respecto a un sistema tradicional, al no necesitar tierra. La fachada es mucho más ligera. La forma de construcción estándar de un muro vegetal pesa solamente 30kg/m² aproximadamente.

-2.2 Sistemas de contenedores modulares con sustrato de tierra: en este caso, las plantas toman el alimento de la tierra. Su textura vegetal no es tan pintoresca como la de los sistemas hidropónicos. Tienen una apariencia más gráfica o parecida a un tablero de ajedrez. A pesar de la desventaja del mayor peso de esta solución, presenta ciertas ventajas respecto a otros sistemas: su forma de construcción modular, con ganchos tipo clip, facilita una mayor flexibilidad y movilidad de las plantas y de montaje. De hecho, las plantas pueden cultivarse previamente en un invernadero hasta el tamaño deseado y luego colocarlas fácilmente en la fachada.



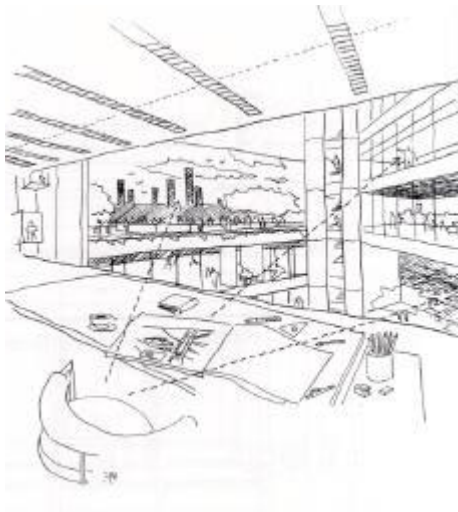
Fachada vegetal con un sistema de contenedores modulares en la exposición Bio-Lung en Aichi, Japón.

Además de integrar la vegetación en las fachadas del rascacielos, se pueden incorporar al mismo con otras soluciones como patios en altura, terrazas y balcones ajardinados.

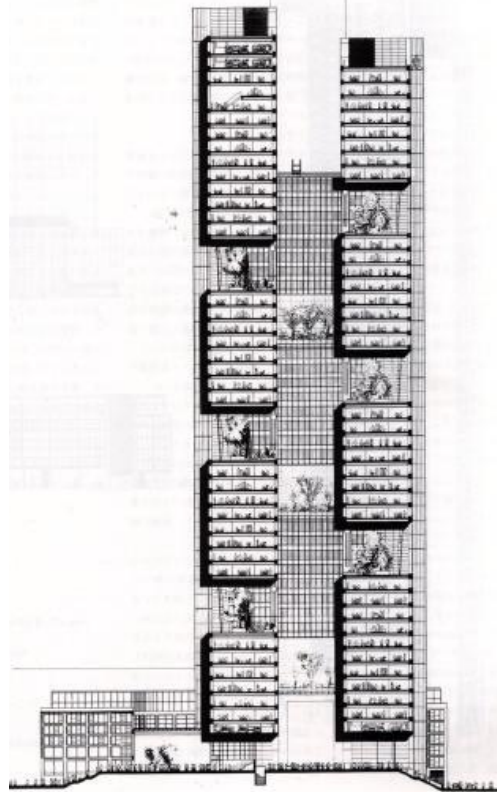


Existen referentes de gran belleza como los jardines verticales del proyecto de Immeuble-Villas de Le Corbusier.

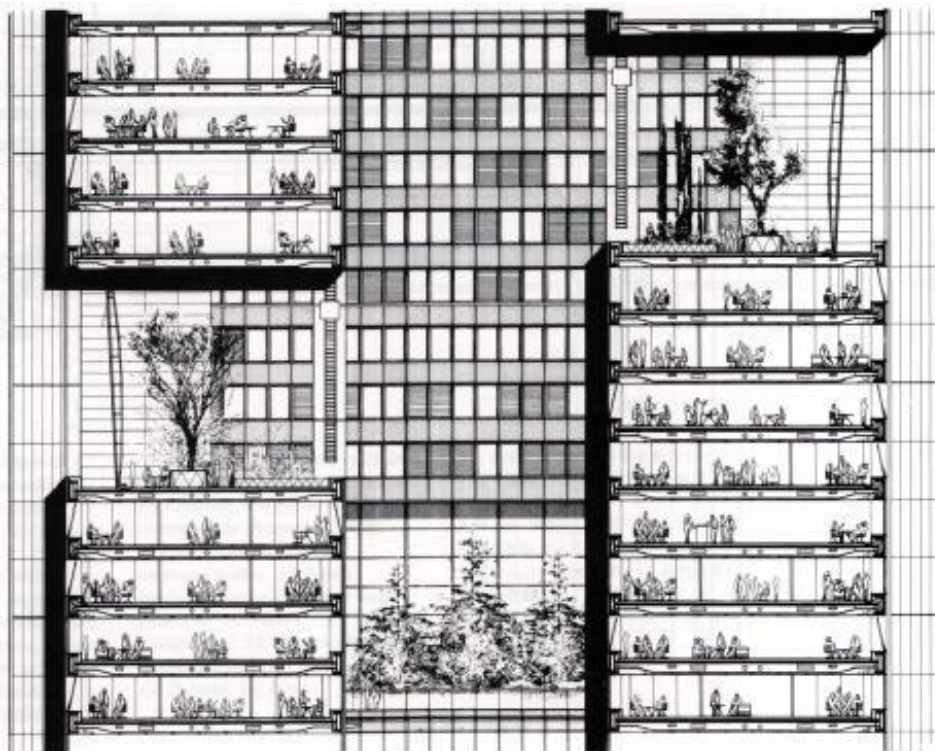
Un ejemplo de vegetación integrada en el rascacielos es el Commerzbank de Norman Foster. En él, se han dispuesto jardines colgantes desarrollados helicoidalmente a lo alto del edificio. Estos jardines ocupan cuatro plantas cada uno, y van rotando aprovechando la forma triangular de la planta.



Sección del Commerzbank.



Vista desde las oficinas del patio ajardinado



Detalle de los patios en sección.

- Ajardinamiento de la cubierta: El ajardinamiento de la cubierta del edificio es otro mecanismo pasivo de protección de la radiación, la protege de la radiación directa del sol, con lo que se reduce la ganancia de calor en el interior. En este tipo de edificio, la cubierta pese a ser la fachada con menos superficie de todas, merece ser considerada. La vegetación en las cubiertas funciona exactamente igual que a nivel de suelo. Sería una equivocación considerar la cubierta de un rascacielos como un entorno demasiado inhóspito como para admitir la existencia de una vida vegetal climáticamente significativa. Existen multitud de plantas resistentes capaces de adaptarse a tales ambientes con un mínimo de profundidad de suelo o de contenido de humus. Por ejemplo, la hierba necesita un grosor de tierra de 150-300 mm; las plantas cobertoras, 300mm; los arbustos pequeños y medianos, 600-750 mm; los arbustos grandes y árboles, 600-1050 mm. Según Ken Yeang ⁵³, un solo árbol grande puede transpirar 450 l de agua diarios, equivalentes a una energía de evaporación de 960.000 kJ, y su efecto es una reducción considerable de recalentamiento del edificio. Para alcanzar el mismo resultado habría que usar 5 aparatos de aire acondicionado de tamaño medio, de 10.500 kJ por hora cada uno, enchufados durante 19 horas al día. Según el mismo autor, hay estudios que demuestran que la temperatura del aire justo encima de las zonas plantadas es entre 1 y 2,25°C inferior a la temperatura ambiente y que la vegetación puede rebajar las temperaturas urbanas de su entorno entre 1 y 1,25°C.

A modo de estrategia general del proyecto, y en la medida de lo posible, conviene reintroducir vegetación autóctona en la cubierta, ya que requiere mucho menos mantenimiento y plantea menos exigencias de agua, fertilizantes y energía que otras especies.

Las cubiertas vegetales no son una solución moderna; han sido una constante a lo largo de la historia de la arquitectura; las descripciones más antiguas son originarias de Egipto y Persia y datan del 2.600 a.C. Los Jardines Colgantes de Babilonia, construidos entre los años 605 y 562 a.C. son uno de los primeros ejemplos documentados de cubiertas ajardinadas. Tenían una superficie aproximada de 1.600 m² y eran terrazas escalonadas construidas sobre un edificio abovedado. Llegaban a una altura de 90 m, desde donde se disfrutaba de admirables panorámicas sobre el valle y el desierto circundante. Se cree que

⁵³ *Ibidem*, p. 241.

fueron construidos por Nabucodonosor en honor a su esposa la reina Semirami por la añoranza que ésta sentía de los bosques y las plantas de su tierra natal.



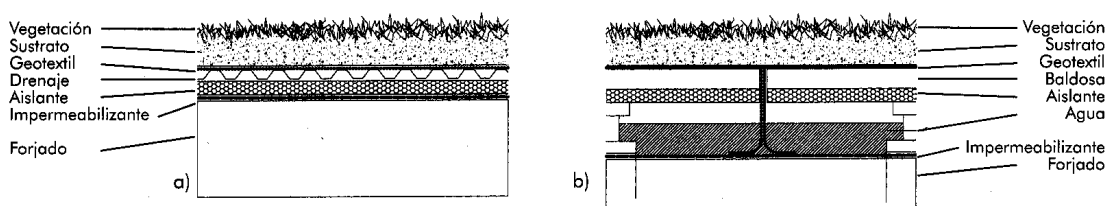
Grabado de Martin Van Heemskerck de los Jardines de Babilonia.



Imagen de la cubierta verde del Ayuntamiento de Chicago. El Ayuntamiento de Chicago ha aprobado recientemente un plan previsto hasta el año 2020 para reverdecer las cubiertas de 6.000 edificios de la ciudad de Chicago, plantando una estimación de 1 millón de árboles. Durante este periodo se estima reducir un 30% la energía que se consume en calefacción y refrigeración. Fuente: www.chicagoclimaction.org

Existen diversos tipos de cubiertas ajardinadas, según el sustrato, tipo de vegetación y el mantenimiento. Según ello, las cubiertas ajardinadas pueden ser de dos tipos, extensivas o intensivas.

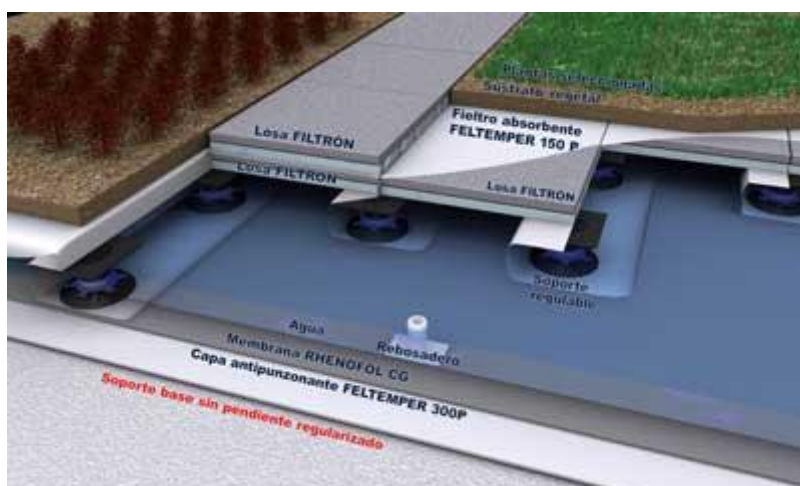
- Cubierta extensiva o ecológica: Tiene una capa vegetal de poco espesor, habitualmente menor de 10 cm., lo que equivale a una carga de 100 kg/ m², con plantas autóctonas de bajo porte, en las que el abastecimiento de agua y de nutrientes se efectúa por procesos naturales. Su mantenimiento es nulo o muy escaso. Las plantas han de ser seleccionadas cuidadosamente para resistir de forma espontánea las condiciones climáticas externas, ya que no tiene casi mantenimiento. Una variedad de la cubierta ecológica es la cubierta aljibe, en la que un pequeño depósito de entre 8 y 20 cm, de altura acumula una cierta cantidad de agua para asegurar el riego de las plantas en los momentos de sequía. El mismo filtro geotextil que evita la caída de finos cumple la función de mecha.
- Cubierta intensiva o ajardinada: Tiene un sustrato de mayor espesor, más de 20 cm., con plantas, árboles y arbustos de mayor altura, un mantenimiento sistemático y un regado periódico. Esta cubierta exige una estructura reforzada por el considerable aumento de las cargas de las plantas y sustratos (entre 20 y 50 cm para herbáceas y hasta 1 o 2 m. para árboles o arbustos). Además, debe colocarse sobre la impermeabilización, una capa drenante de árido de canto rodado, cuyo espesor mínimo es de 20 cm. La sobrecarga en estas cubiertas puede alcanzar entre los 700-1200 Kg/m².



Esquema de dos tipos de cubiertas ecológicas: a) con retenedor de agua, b) con aljibe. Fuente:

Neila ⁵⁴

⁵⁴ Neila, F.J. *Arquitectura Bioclimática en un entorno sostenible*. Ed. Munilla-Lería, Madrid, 2004, p.298.



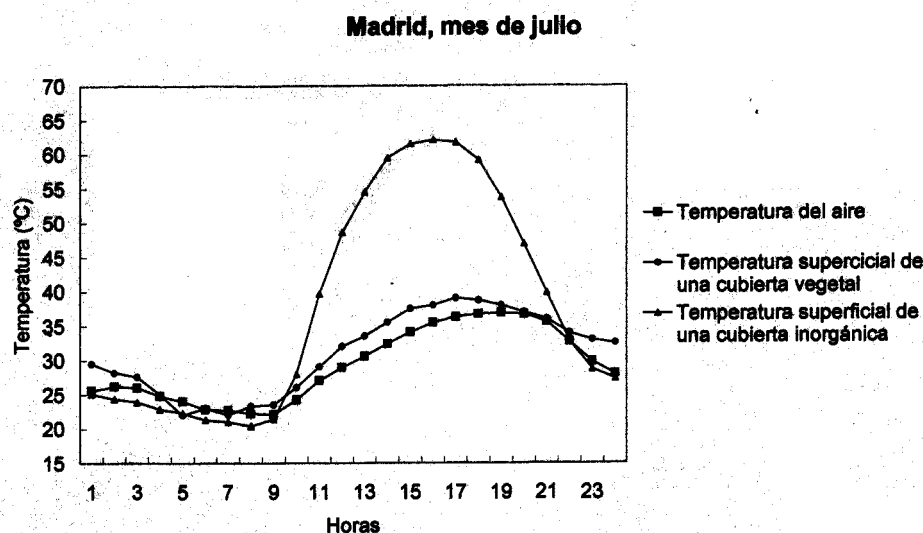
Sección y vista de una cubierta ecológica tipo aljibe.

Fuente: www.intemper.es

Por tanto, la cubierta ecológica es capaz de tener muchas de las ventajas de las cubiertas intensivas, pero sin muchos de sus inconvenientes. De hecho, la gran ventaja de la cubierta ecológica es su comportamiento en condiciones de verano, para prevenir el sobrecalentamiento se que puede alcanzar a través de la cubierta producido por los rayos solares. Por un lado, la capa exterior de hojas juega un papel de protección solar, ya que cuanto más clara y brillante sea la superficie de la hoja tanto mayor será la reflexión de la radiación incidente. Por otro lado, la agregación de hojas lleva a un aumento del sombreado por el efecto de máscara; una hoja aislada, debido a sus propiedades ópticas, puede tener una transmitancia según F. J. Neila ⁵⁵ del 20%, pero al presentarse una capa compacta de hojas superpuestas, puede estimarse una transmitancia global próxima al 0%. De ahí que los valores de la radiación reflejada y absorbida pasen a definir todo el proceso del balance energético de este tipo de cubierta.

⁵⁵ Neila, F.J. *Arquitectura Bioclimática en un entorno sostenible*. Ed. Munilla-Lería, Madrid, 2004, p.299.

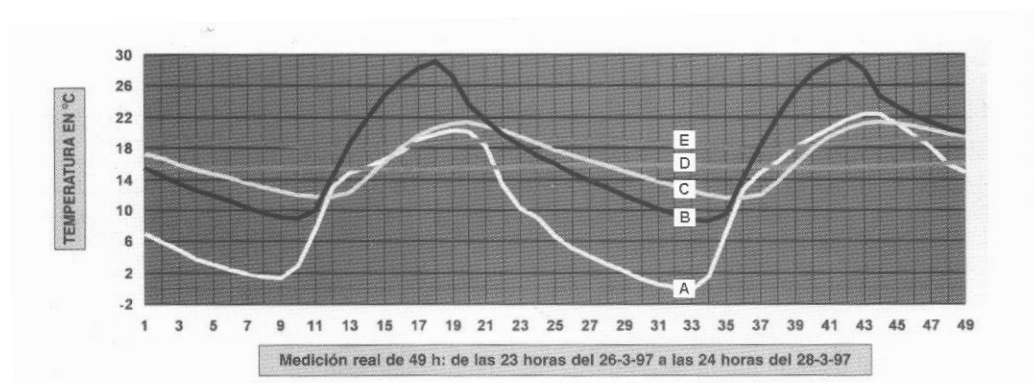
Si la transmitancia ante la radiación solar llega a ser nula, y dado que la reflectancia estará entre el 10-30% en función del color de la hoja, la absorptancia estará entre el 70-90%. Esta cantidad, como podemos apreciar en el siguiente gráfico ⁵⁶, en un acabado inorgánico habría supuesto un incremento notable de su temperatura.



La radiación solar absorbida por la superficie de las hojas no se invierte completamente en aumentar su temperatura, ya que esta energía absorbida se libera en parte por evapotranspiración (entre el 20-40%) y en parte creando biomasa mediante la fotosíntesis (entre el 5-10%). Por otra parte, la propia estructura de la masa vegetal permite la evacuación del aire caliente, por efecto chimenea. Una superficie con vegetación también pierde calor por convección en verano, ya que la temperatura media del aire es generalmente algo más baja que la temperatura superficial de las hojas, y sin embargo, ganará calor por convección en invierno. Según el mismo autor, la evaporación de hasta 2,2 l/m² de agua en una superficie con vegetación extensiva tiene también un efecto beneficioso para los climas secos. Una cubierta con vegetación extensiva, corta y bien regada, puede disipar por evaporación cerca de 3 kWh/ m² durante un día soleado de verano, lo que implicaría hasta el 80% de la energía total recibida. En general, la temperatura promedio que alcanzan las hojas, gracias a este fenómeno, se encuentra próxima a la temperatura del aire. Sin embargo, la diferencia de temperaturas superficiales entre la capa de vegetación y el asfalto puede superar fácilmente los 15°C.

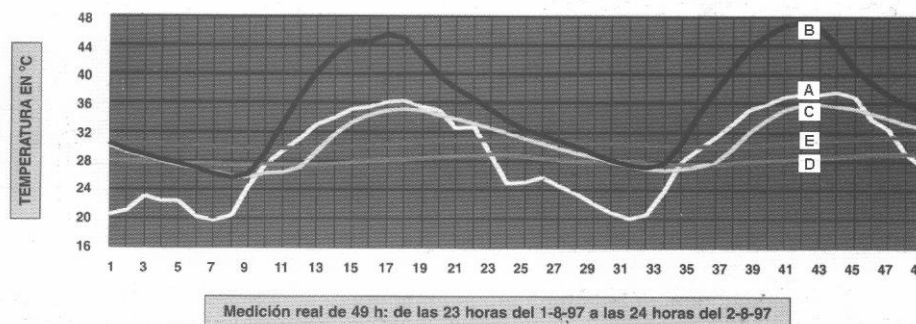
⁵⁶ Ibidem, p. 299.

En la figura inferior, podemos ver el comportamiento térmico de los diferentes sistemas de cubierta. El ejemplo está extraído de los datos obtenidos de la cubierta ecológica experimental del edificio de Fitotecnia de la ETS de Ingenieros Agrónomos de Madrid ⁵⁷, correspondientes a los meses de marzo y agosto. Se puede observar la mejora del comportamiento térmico de la cubierta ecológica y aljibe frente a las oscilaciones de temperatura.



Ambiente frío

- A Temperatura exterior (estación meteorológica elevada sobre la cubierta)
- B Sistema no transitable (impermeabilización + lastre)
- C Sistema ecológico simple (lámina Rhenofol CG + sustrato + plantas)
- D Sistema Intemper TF ecológico aljibe (lámina Rhenofol CG + agua + apoyos + losa Filtrón + fieltro absorbente + sustrato + plantas)
- E Sistema Intemper TF ecológico (lámina Rhenofol CG + Filtrón + sustrato + plantas)



Ambiente cálido

- A Temperatura exterior (estación meteorológica elevada sobre cubierta)
- B Sistema no transitable (impermeabilización + lastre)
- C Sistema ecológico simple (lámina Rhenofol CG + sustrato + plantas)
- D Sistema Intemper TF ecológico aljibe (lámina Rhenofol CG + agua + apoyos + losa Filtrón + fieltro absorbente + sustrato + plantas)
- E Sistema Intemper TF ecológico (lámina Rhenofol CG + Filtrón + sustrato + plantas)

⁵⁷ Cuchí y Burgos, Albert. *La cubierta captadora en los edificios de viviendas*. ITEC, Barcelona, 2002, p.98-99.

3- SELECCIÓN DEL TIPO DE ACRISTALAMIENTO: Otro mecanismo pasivo de ahorro energético consiste en la selección del tipo de acristalamiento que formará parte de los huecos de las fachadas del rascacielos. Se pueden agrupar en tres grandes grupos:

- Acrystalamientos no aislantes: Lunas sencillas formadas por un solo vidrio.
- Acrystalamientos dobles o aislantes a la conducción: Dos lunas separadas por una cámara de aire.
- Acrystalamientos aislantes a la radiación: Vidrios aislantes que pueden venir combinados con un vidrio doble.

Tanto los acristalamientos simples como dobles pueden estar compuestos por tres tipos de vidrios: incoloro, tintado o coloreado y reflectante. El uso de un vidrio aislante en lugar de uno simple implica un menor consumo energético, ya que tiene un coeficiente de transmisión de calor un 31% menor que el de un vidrio simple. El uso de los distintos vidrios tiene consecuencias en el consumo de energía del espacio al que dan, veamos varios ejemplos:

El **vidrio tintado** tiene el efecto de reducir la transmisión térmica del orden de un 20%, lo que sigue siendo insuficiente para atenuar las condiciones en verano en los climas templados como los nuestros, con niveles de radiación solar de entre 500-1000 W/m². El color del vidrio absorbe parte del calor, calentando la cara externa del vidrio, lo que hace que conduzca más el calor, significando un mayor gasto en refrigeración en verano. Lo peor es que el color reduce el paso de la luz natural, lo que afecta negativamente a la calidad de la iluminación de los espacios interiores. El vidrio absorbente de calor absorbe la radiación de onda corta (luz) con lo que se reduce la ganancia calorífica en el interior del edificio. Sin embargo, esta energía almacenada puede ser irradiada al espacio interior a medida que la temperatura exterior comienza a bajar a últimas horas de la tarde. Por lo tanto, en verano el recalentamiento puede ser aún más grave que el que se produciría con el uso de vidrio transparente, mientras que en invierno la absorción del calor se produciría demasiado tarde.

Para reducir la penetración solar sin afectar tanto a las vistas como el vidrio tintado, puede emplearse el **vidrio reflectante**. Esta solución, sin embargo, tiene el inconveniente de reducir tanto la transmisión de onda corta (calor) como la de onda larga (luz), lo que se traduce en una reducción de las ganancias caloríficas útiles en invierno y en el uso de luz artificial durante todo el año a unas horas en que se podría

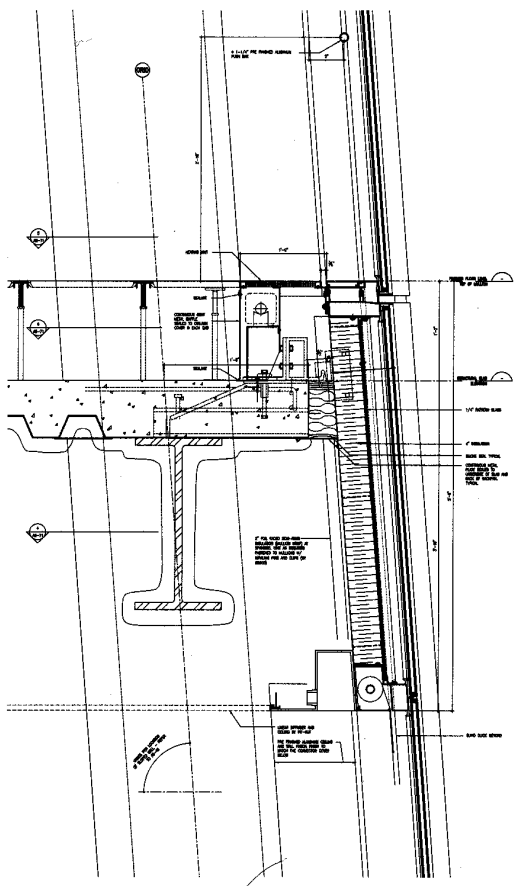
haber empleado la luz natural. En otras palabras, se eliminan ciertas ganancias solares a expensas de la buena calidad y cantidad de la luz natural.

El **vidrio aislante de baja emisión** es útil en condiciones en que se requiera luz natural pero en las que se deba bajar la ganancia calorífica solar. Reduce la ganancia calorífica directa, transmitiendo una proporción mayor de luz que de calor.

En resumen, aunque cada caso conviene estudiarlo en detalle, un planteamiento sensible al medio ambiente debe tender a fomentar el uso de vidrios transparentes o de baja emisión, siempre que sea posible en sus modalidades de alta calidad de vidrios dobles o triples aislantes, por el menor consumo que tiene de energía de refrigeración y calefacción y por no disminuir el nivel de luz natural que le llega al espacio. Aunque esta solución puede implicar un mayor coste del material, se compensa con creces en el coste derivado del uso del edificio durante su vida útil.



Ejemplo de uso de vidrio aislante de baja emisividad en un rascacielos. En el rascacielos Bank of America, (Cook & Fox Architects, 366 m, 2010) de Nueva York, se instaló en sus fachadas un vidrio de baja emisividad. (Sección y vista). Fuente: www.cookplusfox.com



Valores del acristalamiento empleado en el rascacielos Bank of America: vidrio templado 2x 6,5 mm. + cámara sin gas 13 mm. + tratamiento de baja emisividad en la cara interior de la hoja exterior. Trama cerámica de puntos en la zona del antepecho. Factor solar: 0,39. Fuente: Detail ⁵⁸.



El edificio Banco de América tiene una envolvente exterior de una sola capa. Se utilizó un vidrio transparente de baja emisividad en toda la fachada por su buena transmisión de la luz y el color. En los frentes de los forjados, los vidrios presentan una serie de impresiones cerámicas que garantizan una mayor reducción del calor recogido en el interior del edificio, al tiempo que añade una nota de suavidad a la estricta cuadrícula de la fachada.



Para garantizar unas condiciones de iluminación natural adecuadas para el mayor número de empleados del edificio, se decidió emplear un acristalamiento de suelo a techo en la fachada y los tabiques posteriores de las oficinas se ejecutaron en vidrio.

⁵⁸ Arquitectura sostenible: Torre del Banco de América. *Detail Green*:2009, nº 7, p. 787

5.1.4.2 SISTEMAS DE ILUMINACIÓN NATURAL: El objetivo en este punto es conocer los sistemas que permiten utilizar al máximo la luz natural y reducir la necesidad de iluminación artificial, que consume energía. La mayor parte de técnicas de iluminación natural pasiva se basan en controlar la luz natural que incide directamente, reducir sus efectos negativos sobre el confort visual (por ejemplo, el deslumbramiento) y reducir las ganancias caloríficas con la consiguiente disminución del gasto en refrigeración.

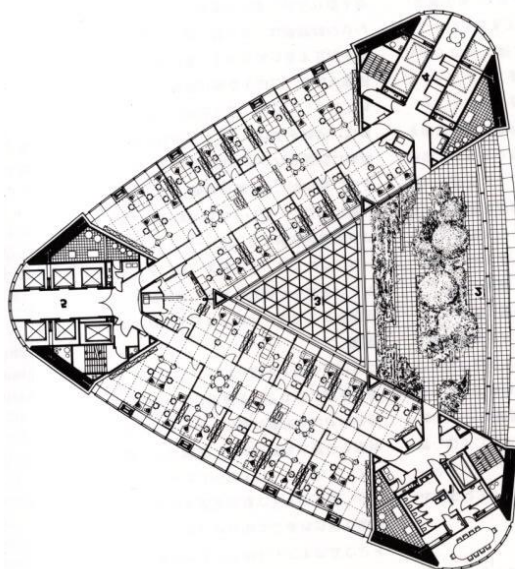
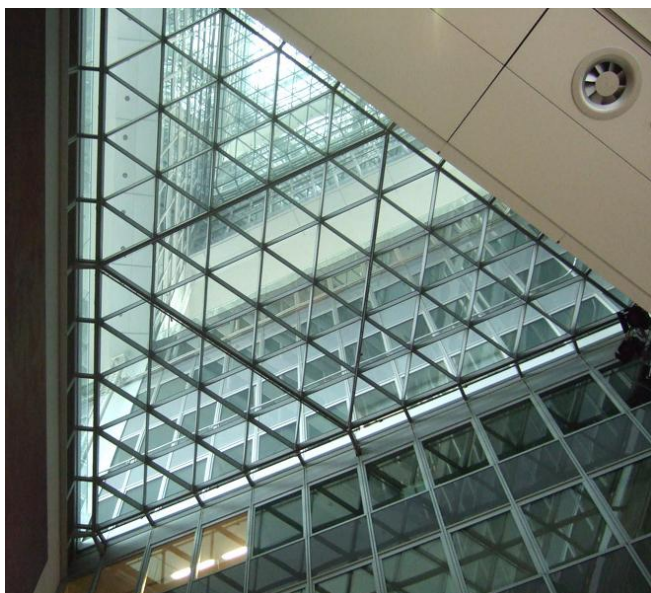
Según Thomas Herzog ⁵⁹, para que los espacios interiores estén bien iluminados, es necesario que las ventanas y los espacios estén distribuidos de tal forma que, en condiciones de cielo nublado en zonas climáticas templadas como las nuestras y con un nivel de iluminación exterior de 10.000 lux, en el fondo de las habitaciones se obtenga un nivel luminoso de 200 lux. Los diseños de iluminación natural habituales pueden proporcionar iluminación natural adecuada hasta unos 4,6 metros de la ventana de altura convencional. Se ha demostrado la ineficacia de emplear ventanas más grandes y vidrios con transmitancias superiores para proporcionar niveles de iluminación suficientes a distancias más alejadas de la ventana. Los niveles de iluminación natural aumentan asintóticamente a medida que nos acercamos a la ventana, de forma que para conseguir una pequeña mejora en el nivel de iluminación en el fondo de la habitación, se precisaría una cantidad de luz natural/radiación solar desproporcionadamente grande.

El primer mecanismo de ahorro energético en iluminación consiste en proyectar una planta menos profunda, para aprovechar al máximo la iluminación natural y reducir la necesidad de iluminación artificial (no conviene superar una profundidad de planta de 14 metros).

*Mecanismos especiales pasivos de iluminación natural aplicables al rascacielos:

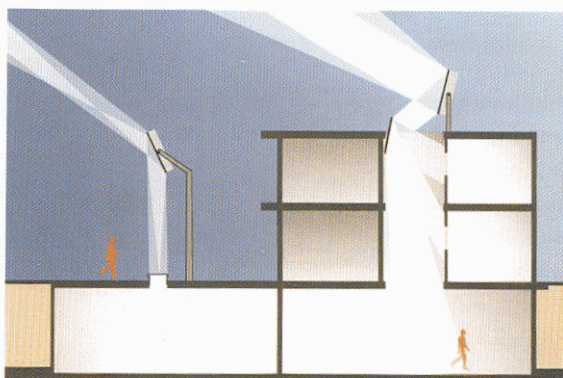
- Patios de luces: Con las superficies especulares actuales muy reflectantes, que absorben tan solo un 2% de cada reflexión, es posible transmitir luz a espacios lejanos a la fachada exterior con patios de luz. Estos patios resultan más eficaces cuando aumenta la relación entre su anchura y profundidad porque se reduce el número de reflexiones, con la consiguiente disminución de la absorción de la luz. Si las paredes del patio fueran muy reflectantes, se transmitiría más luz, o bien el patio podría hacerse más estrecho para la misma transmisión de luz.

⁵⁹ Herzog, Thomas. *Solar energy in Architecture and Urban Planning*. Prestel, Munich, 1996, p.43.



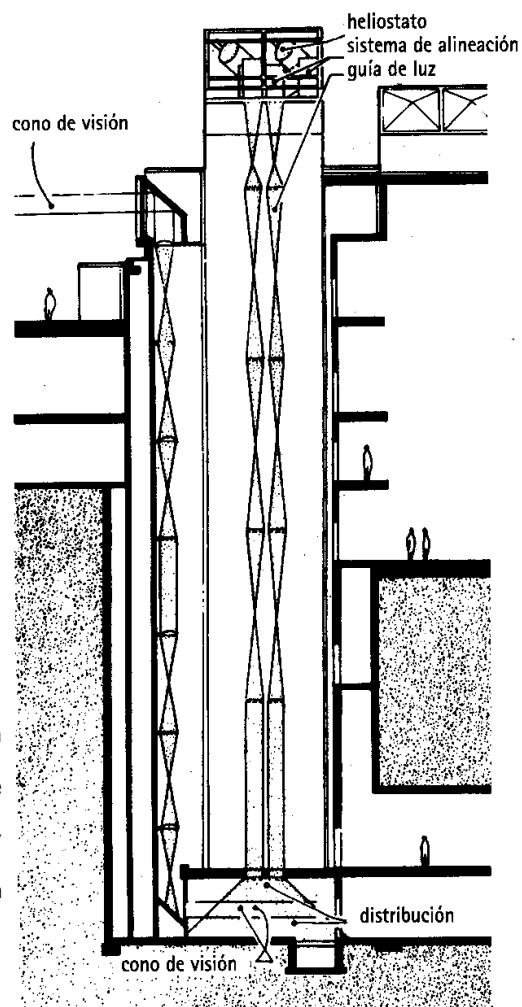
Vista y planta del patio interior de luz del Commerzbank, Frankfurt. Norman Foster.

- Iluminación natural dirigida: Este sistema permite iluminar extensas áreas de un edificio mediante grandes espejos instalados sobre heliostatos.



Dibujo del esquema de funcionamiento del método de iluminación natural dirigida. Un sistema de heliostatos introduce la luz solar en el edificio mediante espejos. (Arriba). Fuente: Tectónica ⁶⁰.

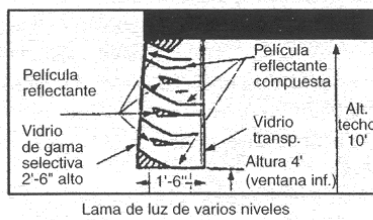
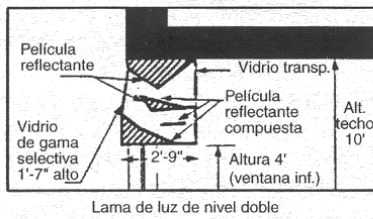
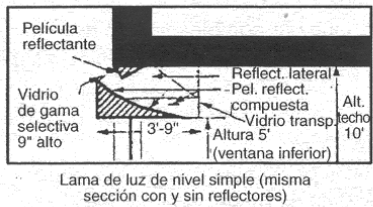
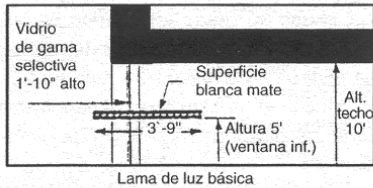
Iluminación natural del espacio subterráneo dirigida mediante espejos y lentes. Donde se requiere iluminación, un elemento difusor intercepta el haz y dispersa la luz. Edificio de Ingeniería Civil de la Universidad de Minnesota, Minneapolis, EE UU. 1983. (Derecha). Fuente: Tectónica ⁶¹.



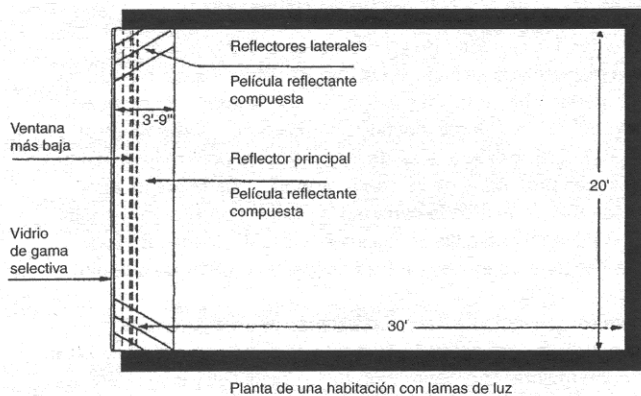
⁶⁰ Lechner, Norbert. Iluminación natural. *Tectónica: Iluminación natural*, Abril 2008, n° 26, p. 21-22

⁶¹ Ibidem, p. 21-22

- Lamas articuladas de luz: El sistema de lamas de luz se basa en la utilización de materiales superficiales con gran poder reflectante y de transmisión así como en la geometría empleada para reorientar la luz natural del modo más eficaz. Reflejando la luz del sol en el plano del techo, consiguen llevar la luz natural hasta profundidades superiores a las que se consiguen con ventanas o claraboyas convencionales. Según Ken Yeang ⁶², pueden ofrecer una iluminación ambiental adecuada para tareas de oficina en una profundidad respecto a la fachada de 4,6 m hasta 9,1 m.



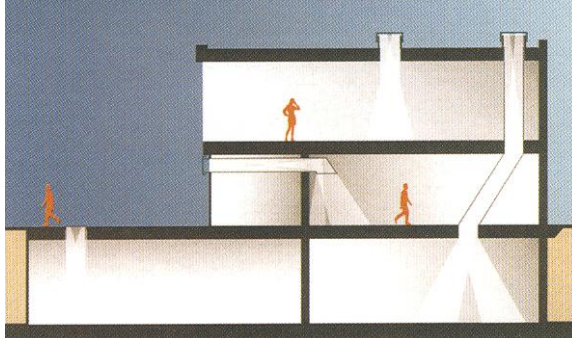
Ejemplo de utilización de iluminación natural con lamas de luz. Edificio de oficinas en Madrid. Junquera Arquitectos, 2007.



Esquemas de lamas de luz en sección y planta.

⁶² Yeang, Ken. *El rascacielos ecológico*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2001, p. 229.

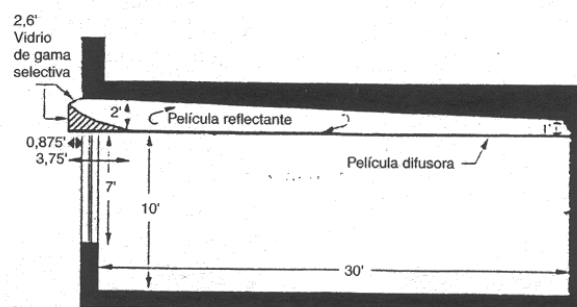
- Conductos reflectantes de luz: Son conductos tubulares de superficie interior especular altamente reflectante que transmiten alrededor del 50% de la luz exterior a cinco metros de distancia. La cantidad de luz depende del diámetro (20 a 100 cm.) y la longitud.



Esquema de funcionamiento de diferentes conductos de luz situados en cubierta, fachada y suelo exterior. Fuente: Tectónica ⁶³.



Conducto de luz solar de 36 m. de longitud constituido por una capa difusora exterior de tejido de lycra y núcleo de prismas de vidrio. Un heliostato en cubierta suministra la luz solar.



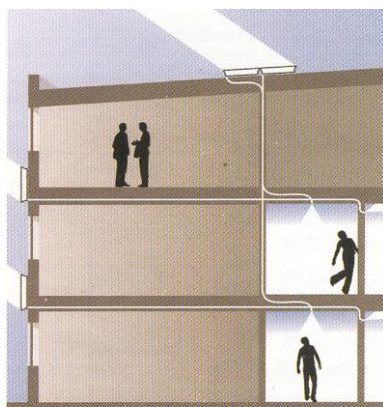
Sección de una habitación iluminada por un tubo de luz.

⁶³ Lechner, Norbert. Iluminación natural. *Tectónica: Iluminación natural*, Abril 2008, n° 26, p. 21-22

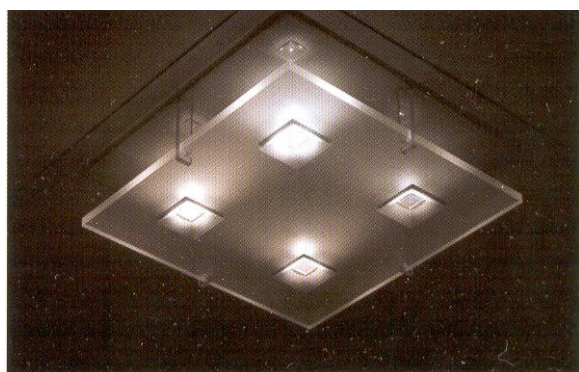
- Fibra óptica y conductos de luz por reflexión total interna: Los conductos de luz y fibras ópticas utilizan el fenómeno de la reflexión total interna, que es mucho más eficiente que los anteriormente descritos. Se emplea un heliostato para seguir el sol y reflejar los rayos en los extremos de estas guías. Estas guías de luz son iluminadas por un extremo con luz natural directa que es casi paralela a la fibra o conducto. La fibra óptica utiliza varillas finas de vidrio o metacrilato. Su pequeño diámetro permite realizar curvas bastante cerradas. De este modo, la luz puede ser conducida casi con tanta facilidad como la electricidad por un cable. La luz que alcanza el extremo opuesto de la fibra, será la fuente de luz de una luminaria de fibra óptica. Los conductos de luz están fabricados con una película prismática de plástico que transmite la luz por reflexión total interna.



Panel captador de luz natural formado por lentes Fresnel que se orientan con el sol y dirigen la luz a los cables de fibra óptica. Fuente: Tectónica ⁶⁴.



Esquema de funcionamiento de los sistemas de iluminación natural por fibra óptica. Permiten llevar la luz recogida en fachada o cubierta hasta el interior del edificio.



Luminaria conectada a captador solar.

⁶⁴ Ibidem, p. 22

5.2 SISTEMAS MIXTOS DE AHORRO ENERGÉTICO APLICABLES AL EDIFICIO EN ALTURA.

Los sistemas mixtos de ahorro energético son aquellos que están asistidos parcialmente por medios electromecánicos (dependen parcialmente de energía artificial) y las energías ambientales del lugar. Pueden ser:

5.2.1. VENTILACIÓN ASISTIDA MECÁNICAMENTE.

En zonas templadas como es el caso de Barcelona y Madrid, el planteamiento mixto fomenta la ventilación natural asistida mecánicamente cuando las temperaturas exteriores son favorables.

En verano y a media temporada se puede refrigerar el edificio introduciendo el aire exterior hacia el interior mecánicamente y previo filtrado en las horas en las que la entalpía del aire exterior es menor que la del interior. Este mecanismo se conoce genéricamente como *free-cooling*.

En invierno, las pérdidas energéticas se pueden reducir utilizando un sistema de ventilación asistido mecánicamente, recirculando parte de aire extraído o recuperando calor del sistema de extracción. El ahorro de energía se explica por el hecho de que prácticamente se elimina la entrada de aire frío a través de las ventanas abiertas, lo que obligaría a calentar el espacio más de lo que sería necesario para compensar la excesiva infiltración de aire frío.

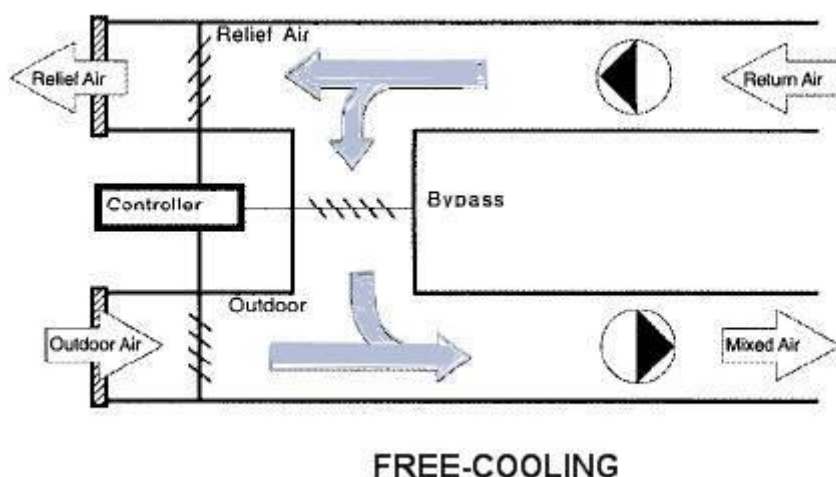


Fig. Esquema de funcionamiento del sistema *free-cooling*

El uso de sistemas de ventilación asistida mecánicamente permite un ahorro importante de energía en climatización, especialmente en climas como los de Madrid y Barcelona, en los que su uso puede ser suficiente para alcanzar el nivel de confort durante el 70% de los días del año.

5.2.2. VENTILACIÓN VOLUMÉTRICA O DE DESPLAZAMIENTO.

El sistema de ventilación volumétrica consiste en introducir en verano aire a nivel del suelo, enfriando únicamente la zona ocupada hasta 1,8 m. de altura por encima del pavimento. Esto permite que se ahorre energía, ya que no es necesario acondicionar el espacio que está por encima de la cota 1,80 m. Asimismo se obtiene un aire interior más limpio, ya que se obliga a los contaminantes a ascender hacia la zona de extracción situada en la parte alta.

Además puede aprovecharse la masa inerte de los forjados de hormigón y los huecos en el techo para proporcionar cierta refrigeración adicional gratuita (del orden de 1°C aproximadamente), ya que la temperatura del forjado será inferior a la de la habitación. El efecto refrigerante puede ser reforzado haciendo circular durante algunas horas de la noche aire frío del exterior, para eliminar todo el calor residual del forjado.

Este sistema es fácilmente aplicable al edificio en altura y le permite ahorrar importantes cantidades de energía en calefacción y refrigeración, dos de las partidas con mayor coste energético en la vida útil de un edificio.

5.2.3. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN SOLAR.

El sistema se utiliza en épocas calurosas y consiste en unas largas tuberías enterradas, con un extremo abierto al exterior y otro abierto al interior del edificio. Unos ventiladores aspiran aire del exterior y lo introducen en las tuberías subterráneas, donde el aire se enfría al ceder calor al terreno y circula hacia el interior del edificio. Este sistema es de difícil aplicación en el rascacielos, dado que el recorrido que tendrían que hacer estas tuberías sería excesivo, por lo que perdería toda efectividad.

5.2.4. SISTEMAS ACTIVOS DE REFRIGERACIÓN POR EVAPORACIÓN.

Este sistema utiliza unos ventiladores que arrastran el aire a través de un medio húmedo, como agua pulverizada o almohadillas humedecidas. La evaporación de esta agua enfría la corriente de aire, refrigerando el espacio interior.

Su aplicación en el edificio en altura representaría un importante ahorro energético de refrigeración en verano. El uso de este sistema implica la disminución de aparatos de aire acondicionado, con el importante gasto energético que éstos comportan.

5.2.5. SISTEMAS DE CAPTACIÓN SOLAR TÉRMICA.

Emplean colectores solares para convertir la energía solar en calor útil para generar agua caliente sanitaria o calefacción ambiental. Para ello, requieren equipos impulsados

electromecánicamente, como bombas o ventiladores, para mover el fluido. En vivienda satisfacen al menos el 40% de las necesidades de calefacción del edificio. Para lograr la demanda energética en invierno o en épocas de baja radiación, conviene tener un sistema auxiliar convencional de apoyo. El sistema auxiliar se activará siempre que el termostato detecte una temperatura de salida del agua inferior a la deseada. Las temperaturas logradas por los captadores térmicos posibilitan el almacenamiento de la energía en acumuladores de agua, que después es dirigida a los puntos de consumo. Un buen aislamiento del acumulador y de las tuberías permite conservar el calor durante la noche y disponer de agua caliente aunque no haga sol. Sin embargo, las posibilidades de distanciar el momento de consumo del de la captación son muy reducidas, de modo que la energía debe emplearse pocas horas después de haberla captado, hecho que limita los usos de este sistema de captación de la energía solar. En España el rendimiento medio de este tipo de instalaciones está alrededor de los 650 kWh/m² año. Este alto rendimiento (en España, la radiación solar media es de 1000 kWh/m² año) y el relativo bajo coste de su instalación hace que sea el tipo de instalación solar más extendida.



Foto de un sistema de placas solares térmicas.

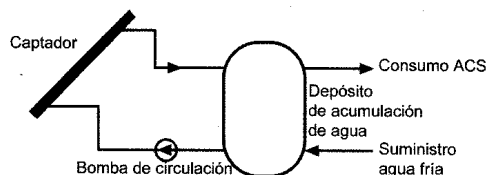
*Descripción del sistema: Tomaremos como ejemplo los sistemas de captación solar térmica que se emplean para el calentamiento de ACS en viviendas plurifamiliares. Este caso es extrapolable a los rascacielos de viviendas. Los conforman los siguientes elementos básicos:

- Captadores solares: El captador solar sirve para captar la energía de la radiación solar y transferirla a un fluido para calentarlo.
- Acumulador.
- Sistema de control.
- Sistema de apoyo.

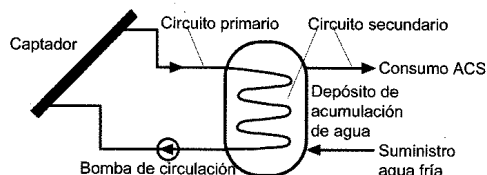
*Tipos de circuitos:

- Abiertos: El agua de consumo se calienta directamente en el captador y se almacena en un depósito aislado preparada para el uso. Aunque son eficientes y tienen gastos de explotación reducidos, no son adecuados cuando hay riesgo de heladas ni en casos de aguas duras o ácidas, que provocan corrosión y los oxidan.
- Cerrados: Hay dos circuitos independientes. El primario, para calentar el fluido termoconductor dentro del captador, y el secundario o de consumo directo de agua. El intercambio de calor se realiza mediante un intercambiador situado en el acumulador.

Sistemas de circuito abierto por ACS

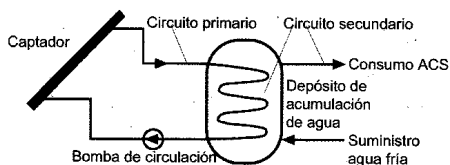


Sistemas de circuito cerrado por ACS

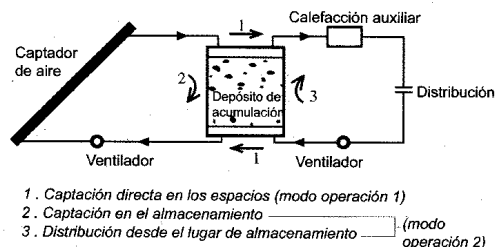


Este tipo de instalación también se puede utilizar para sistemas de calefacción con líquido caliente en circulación (radiadores o *fan-coils*) o para introducir directamente aire caliente en el edificio.

Sistemas de calefacción con líquido



Sistemas de calefacción por aire



Esquemas de tipos de circuitos. Fuente: Cuchí ⁶⁵.

⁶⁵ Cuchí Burgos, A. *La cubierta captadora en los edificios de viviendas*. ITEC, Barcelona, 2002, p. 40.

*Tipos de Captadores:

- a. Captadores planos estándar: Son los más usados actualmente. Usos: ACS, calefacción por suelo radiante, climatización de piscinas. Se componen de un captador metálico (de cobre, aluminio o acero) parecido a un serpentín o a una parrilla, y de unos tubos metálicos que contienen un fluido conductor de calor. El captador transmite la energía solar en forma de calor a los tubos, que la llevan a unos intercambiadores o la dirigen directamente a los depósitos de acumulación. Para minimizar las pérdidas y aumentar el rendimiento, el captador está situado dentro de una carcasa (metálica o plástica) convenientemente aislada (con fibra de vidrio, lana de roca o espuma de poliuretano) y lo recubre un vidrio por la cara expuesta al sol, de forma de que su interior se produzca el efecto invernadero, con temperaturas que pueden alcanzar los 60-70°C.

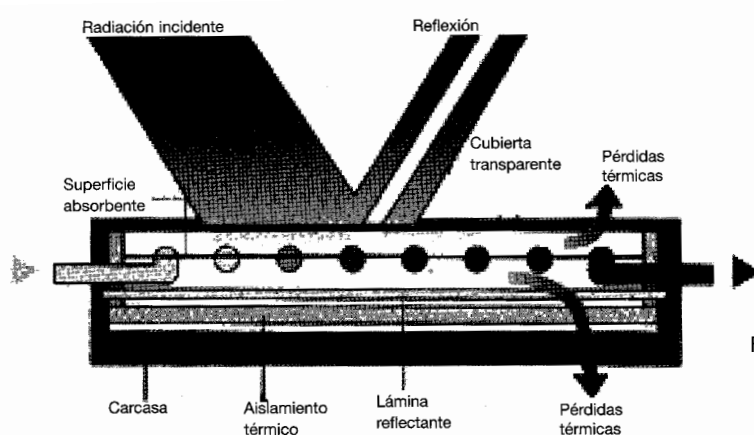


Fig. Captador plano estándar

- b. Captadores solares planos sin cubierta: Son los más económicos y sencillos, pero tienen un rendimiento más bajo porque, al no estar protegidos por una cubierta vitrificada, no se produce el efecto invernadero y las pérdidas energéticas son mayores. Se destinan a aplicaciones que requieren bajas temperaturas, como climatización de piscinas o el calentamiento de ACS con temperatura de servicio baja. Pueden ser de acabado metálico o de material plástico.
- c. Captadores de vacío: Son más caros, pero tienen un rendimiento elevado. Usos: ACS, sistemas de calefacción e instalaciones industriales que requieran elevadas temperaturas.

Están formados por hileras de tubos de vidrio transparente. Cada tubo contiene otro tubo de absorción por donde circula el líquido conductor de calor. Entre los dos tubos

se produce el vacío para eliminar las pérdidas por conducción y convección. Pueden lograr temperaturas del orden de 70-100°C.

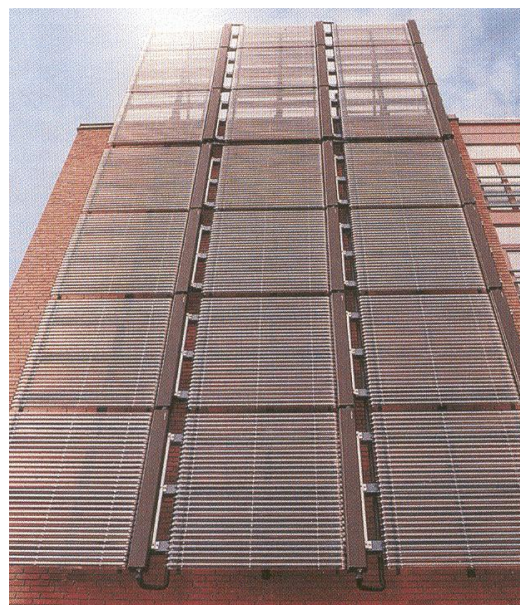
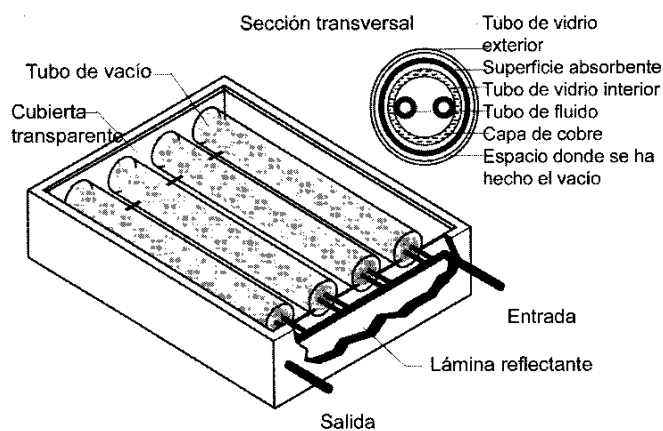


Fig. Dibujo de un captador de vacío y ejemplo de instalación de fachada de captadores térmicos de tubo de vacío. En el edificio de altura, dada la baja relación superficie de cubierta/superficie construida, los sistemas de captación solar en cubierta no producen suficiente energía. Sin embargo, sus fachadas sí permiten incrementar esta superficie de captación y cubrir las necesidades del edificio.

*Formas de colocación de los captadores térmicos en el edificio:

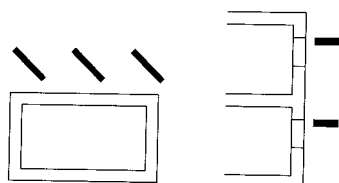
a. Sistemas de captación independiente:

Ventajas:

- Fácil montaje en techos planos y edificios ya construidos.
- El grado de inclinación puede ser óptimo.
- Estructura independiente de la estructura del edificio.

Inconvenientes:

- Impacto visual.
- No representa un ahorro económico en el uso de elementos constructivos.



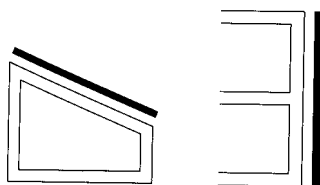
b. Sistemas de captación superpuesto:

Ventajas:

- Fácil montaje.
- Disminuye el impacto visual al situarse en un plano paralelo a la piel del edificio.
- La ventilación a través de la cara posterior del panel garantiza un buen funcionamiento.

Inconvenientes:

- El grado de inclinación está condicionado por la inclinación de la piel.
- No representa un ahorro económico en el uso de elementos constructivos.



c. Sistemas de captación integrado: Son sistemas integrados en la piel del edificio, cubierta o fachada. En la cubierta puede llegar a sustituir total o parcialmente el material de acabado, mientras que en la fachada puede usarse como elemento de protección solar.

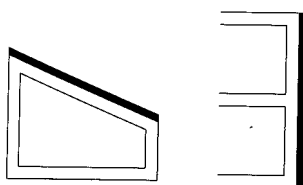
Ventajas:

- El ahorro económico que supone la sustitución de los materiales tradicionales de acabado por elementos fotovoltaicos permite rentabilizar la instalación en un plazo más corto.

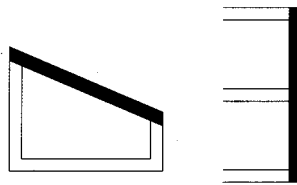
Inconvenientes:

- Han de ofrecer garantías de estanqueidad, durabilidad, etc. Similares a las de los materiales convencionales de acabado.

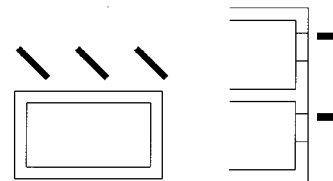
Elementos de revestimiento



Elementos de cierre



Elementos de sombra



5.2.6. SISTEMAS DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA TEMPERATURA.

La energía geotérmica se obtiene a partir del calor que se genera en el núcleo de la tierra y que se transmite hasta su corteza, desde donde puede aprovecharse para su uso en edificios como rascacielos. Esta energía está a temperatura constante (por ejemplo: entre 9 y 13º en el Reino Unido) y puede utilizarse para moderar las fluctuaciones estacionales de temperatura. Funciona como un depósito de calor en invierno y como un disipador térmico en verano. Esto permite reducir el consumo primario de energía, tanto en calefacción durante el invierno como en refrigeración en verano. Aunque este sistema ofrece beneficios para todo tipo de rascacielos, es más eficiente en aquellos de oficinas, en los que se produce un uso continuado del edificio.

Para determinar el aprovechamiento geotérmico de un subsuelo existe un Test de Respuesta Térmica (TRT), aunque es más fiable conocer las características geotécnicas del terreno, y más concretamente su conductividad, calor específico y contenido de agua, y si ésta es circulante o no. Hay que tener en cuenta que, por ejemplo, un terreno rocoso o anegado tiene un calor específico y una conductividad superior a terrenos arenosos o arcillosos secos.

También hay que tener en cuenta que estos sistemas, al aprovechar energéticamente el terreno, alteran su temperatura, enfriándolo en invierno y calentándolo en verano, por lo que, para que realmente funcionen se deben equilibrar los ciclos estacionales, de modo que la temperatura media del terreno no varíe o lo haga lo mínimo respecto a las condiciones iniciales. Si no fuese así dejarían de ser eficientes. Por tanto, no se puede utilizar en todos los climas y regiones. En países como España, los sistemas geotérmicos sí son eficientes, y se pueden utilizar tanto para calefacción como para refrigeración, ya que al enfriar el terreno en invierno y calentarlo en verano, se equilibran los ciclos.

Aunque la Tierra acumula una gran cantidad de energía, su temperatura es inferior a la que se quiere alcanzar en los espacios interiores, por lo que su aprovechamiento debe ser contra el gradiente térmico. Por ello se requiere el uso de una bomba de calor diseñada exclusivamente para el aprovechamiento de este tipo de energía a un nivel de temperatura útil. El rendimiento de las bombas de calor no es constante, ya que a medida que el terreno se va enfriando en invierno, el rendimiento de la bomba que produce calor va disminuyendo. En verano, a medida que el terreno se va calentando, el rendimiento en la producción de frío también disminuye. Por consiguiente, los rendimientos máximos se dan en el cambio de ciclo

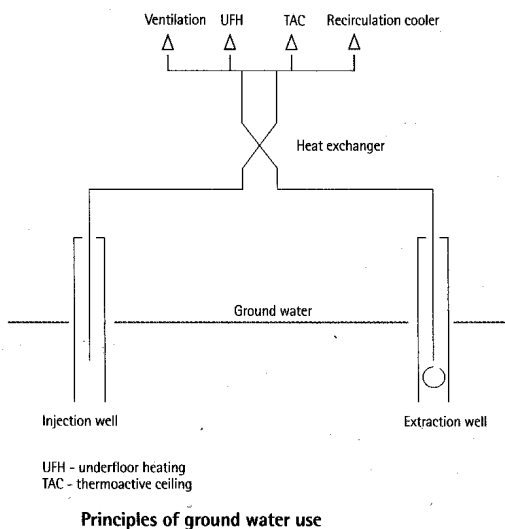
estacional. El rendimiento máximo se establece en 7 kW térmico/ kW eléctrico y el mínimo en 3,5 kW térmico/ kW eléctrico, por lo que el rendimiento medio de este tipo de instalaciones es de 5 kW térmico/ kW eléctrico.

Las bombas de calor geotérmicas tienen costes de mantenimiento bajos, una fiabilidad alta, no necesitan aparatos de alta tecnología y prácticamente no generan emisiones. Según Brian Edwards ⁶⁶, comparadas con los sistemas tradicionales de calefacción, las bombas geotérmicas pueden reducir las emisiones de CO2 entre un 40 y un 60%.

*Sistemas principales de bombas de calor geotérmicas:

- sistemas de circuito cerrado: Consiste en un circuito de tuberías de plástico enterradas en el suelo en sentido horizontal o vertical y por las que circula un líquido anticongelante. En el caso de los rascacielos se utiliza únicamente en sentido vertical, aprovechando las cimentaciones profundas que hay que realizar. El horizontal no se utiliza debido a que requiere una extensión de terreno equivalente al doble de la superficie en planta del edificio, lo que sería excesivo en zonas urbanas.

- sistemas de circuito abierto: Utiliza el agua freática, que se hace pasar por una bomba para extraer la energía y después se utiliza para calentar o refrigerar el edificio.



Design parameters for boreholes	Cooling	Heating
Average output	30–40 W/m	40–50 W/m
Output with ground water flow > 0.5 m/day	40 W/m	> 50 W/m
Output without ground water flow: poor thermal conductivity of the ground (dry sand)	< 30 W/m	25–30 W/m
Output without ground water flow: good thermal conductivity of the ground	< 30 W/m	30–35 W/m
Average heat and cold energy storage		60–80 kWh/m
Maximum extraction temperature (summer)		ca. 20 °C
Minimum extraction temperature (winter)		ca. 2 °C

Simplified guide values for the design of earth piles and boreholes
The above heating and cooling outputs are given per 1 m length of borehole or pile (in accordance with EMPA).

Esquema de funcionamiento de un sistema geotérmico con agua (izquierda) y parámetros de refrigeración y calefacción de 1 metro lineal de perforación vertical (derecha). Fuente: Hausladen ⁶⁷.

⁶⁶ Edwards, Brian. *Guía básica de la sostenibilidad*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2ª ed. 2008, p. 82.

⁶⁷ Hausladen, Gerhard et al.. *Climate Design: Solutions for buildings that can do more with less technology*. Ed. Birkhäuser, Basilea, 2005, p. 172.

5.2.7. SISTEMAS DE REUTILIZACIÓN DE AGUA.

Aunque los temas relacionados con el agua exceden la extensión de esta tesis, no queremos desaprovechar la ocasión para recordar la importancia medioambiental que se deriva de un buen uso de la misma. Actualmente hay dos formas de reducir el consumo de agua: el uso de aparatos que minimicen su consumo y la implantación de equipos de reutilización de la misma, especialmente del agua de lluvia.

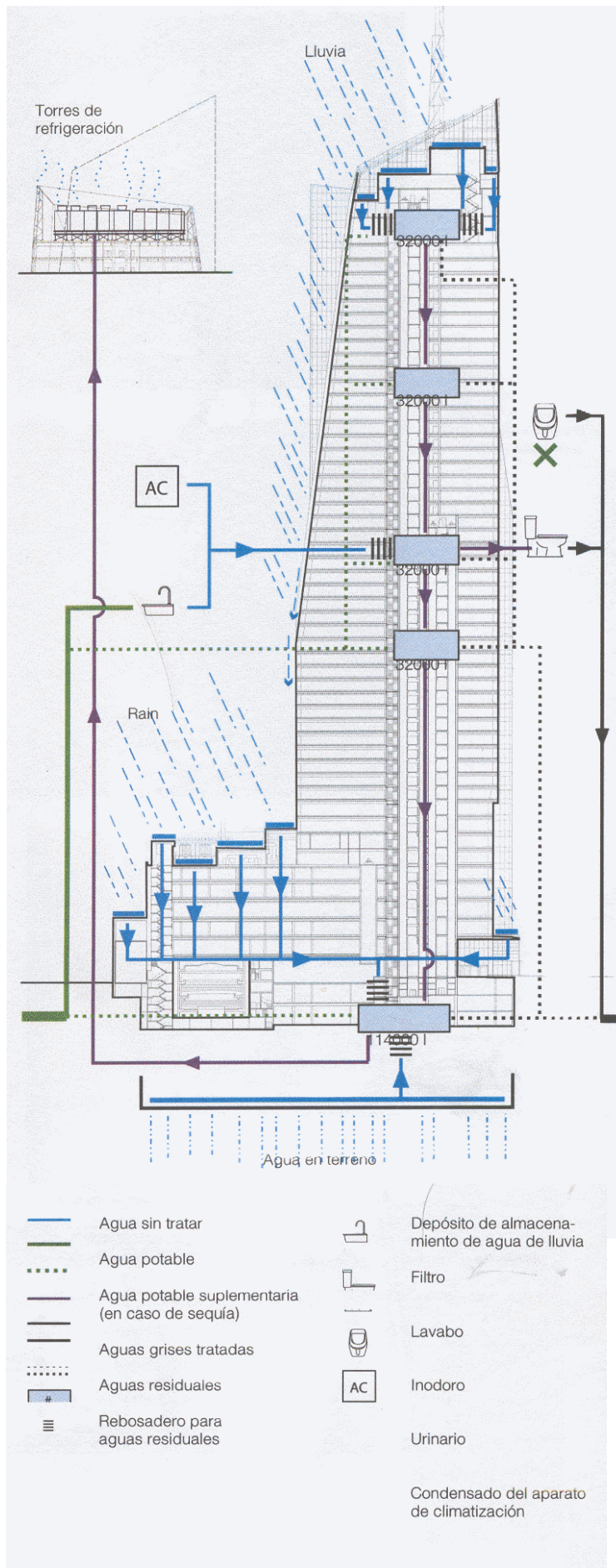
Un ejemplo de aplicación de estos principios de reutilización de agua en un rascacielos lo encontramos en la torre Banco de América en Nueva York, de los arquitectos Cook & Fox. Las diversas cubiertas planas del edificio recogen el agua de lluvia que cae sobre las mismas y sobre las fachadas. Especialmente valiosa es el agua que cae sobre las superficies horizontales en las partes altas de la torre, que se dirige a cuatro tanques de aguas grises en diversas plantas del edificio. De esta manera no se pierde el valioso potencial energético de la gran altura y el agua es aprovechable sin necesidad de bombas. El tanque más elevado se llena en primer lugar, después el segundo en altura y así sucesivamente. El resto del agua fluye hasta el tanque central del sótano del edificio. Aquí, después de filtrarse, se mezclan el agua freática, la de lluvia, el excedente del agua de los tanques más pequeños, el agua usada de los lavabos y la de condensación del sistema de ventilación. El agua resultante se utiliza para el enfriamiento y en las cisternas de los inodoros. Sólo los lavamanos reciben el agua sanitaria de la red.

Sin embargo, el mecanismo que ha supuesto el mayor ahorro de agua en el edificio ha sido el uso de urinarios sin agua.

Se calcula que la reducción total del consumo de agua derivado de las medidas mencionadas en la torre Banco de América alcanza aproximadamente los 400 millones de litros anuales, prácticamente la mitad de las necesidades de un edificio de tamaño comparable y un ahorro de 500.000 \$ (aprox. 345.000€).⁶⁸

⁶⁸ Arquitectura sostenible: Torre del Banco de América. *Detail Green*:2009, nº 7, p. 786

Fig. Sistema de reutilización de agua en la Torre Banco de América.



5.3 SISTEMAS ACTIVOS DE AHORRO ENERGÉTICO APLICABLES AL EDIFICIO EN ALTURA.

Son sistemas completamente artificiales de iluminación, ACS, climatización y producción de energía, totalmente dependientes de la energía artificial. A pesar de ello, producen relativamente pocos impactos ambientales.

El edificio en altura, al igual que cualquier otro edificio de alta densidad de ocupación, debe aspirar a ajustar sus necesidades de energía (en climas templados como el de Barcelona y Madrid) a unos 100 kWh/m² año o menos, comparados con los típicos 230 kWh/m² año de los edificios con acondicionamiento de aire total y los 150-250 kWh/m² año de los edificios de oficinas sin aire acondicionado.

Pueden obtenerse unos ahorros energéticos significativos optimizando el consumo energético de algunas instalaciones. Para ello debemos utilizar sistemas mejorados (activos) fundamentalmente de iluminación, ACS y climatización. El resto de instalaciones no tienen tanta incidencia en el total de energía utilizada a lo largo del ciclo de vida de un edificio, tal y como queda patente en el siguiente cuadro.

	Residencial	Residencial	Oficinas
Fuentes	idae	eren	idae
	%		%
Iluminación	3	8	35
ACS	26	20	
Electrodomésticos y equipos	12	17	11
Cocina		11	
Calefacción y refrigeración	59		
Calefacción		44	23
Refrigeración			31
Total	100	100	100

Fig. Cuadro de consumos pormenorizados de un edificio. Fuente: Tectónica nº 31.⁶⁹

5.3.1 SISTEMAS ACTIVOS DE ILUMINACIÓN:

Una estrategia de ahorro energético en iluminación consiste en la sustitución de lámparas incandescentes o halógenas por lámparas fluorescentes o lámparas de led. El ahorro energético conseguido por emplear fluorescentes o led es del 77% aproximadamente en comparación con la incandescencia clásica y del 67% si es con la halógena. En el caso de edificios de altura de oficinas, el ahorro por empleo de lámparas eficientes puede ser muy

⁶⁹ Azpilicueta, Enrique. Hacia un óptimo energético. Instalaciones y energía. *Tectónica: Energía II*, Febrero 2010, nº 31, p. 12.

alto, ya que se estima que la iluminación artificial supone el 35% del consumo energético total del edificio.⁷⁰

El único aspecto a mejorar o a matizar mediante filtros es la temperatura de color de las lámparas de bajo consumo, aspecto que las lámparas led han ido mejorando constantemente.






					
Lámpara	A Lámpara estándar	QT Lámpara halógena	HIT Lámpara de alta presión	T/TC Lámpara fluorescente	LED Diodo luminoso
Eficacia luminosa lm/W	15	22-25	92	87-94	62-77
Clase de eficiencia energética	E	B-D	A	A	A

Fig. Eficacia luminosa y clase de eficiencia energética según el tipo de lámpara. Fuente: www.erc.es

Otra forma de optimizar consumos de iluminación consiste en la implantación de sistemas de control de iluminación, empleados fundamentalmente en los edificios de oficinas. Estos sistemas regulan el nivel de iluminación de las lámparas en función del nivel de iluminación natural y de la presencia o ausencia de ocupantes. Uno de los más extendidos es el DALI (Digital Addressable Lighting Interface), que permite realizar de un modo sencillo cambios de configuración de encendidos y niveles de iluminación así como un control de la vida de las lámparas, etc.

Otro aspecto a tener en cuenta es la emisión de calor de los diferentes tipos de luminarias. En invierno, las lámparas incandescentes pueden ayudar a calentar los edificios (aunque con una energía eléctrica cara) pero en verano suponen una gran carga para la climatización.

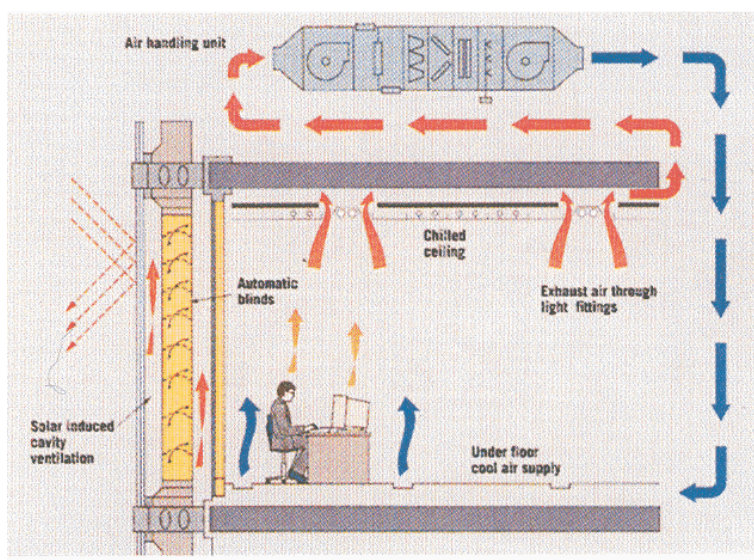


Fig. Esquema de ventilación, calefacción y refrigeración de oficina con extracción de aire a través de las luminarias. Edificio Helicón en Londres. Sheppard Robson, 1996.

⁷⁰ Ibidem, p.15

5.3.2 SISTEMAS ACTIVOS DE CLIMATIZACIÓN:

Pueden obtenerse unos ahorros energéticos significativos optimizando el consumo energético de instalaciones de climatización, especialmente teniendo en cuenta que los edificios situados en la zona templada tienen un consumo energético en calefacción del al menos el 48% del total.

En los edificios en los que no quede más remedio que utilizar aire acondicionado, es recomendable seguir las siguientes instrucciones para disminuir su gasto energético:

- Evitar los sistemas de doble conducto o los de recalentamiento terminal de volumen constante, pues ambos comportan un enfriamiento del aire y un recalentamiento según las necesidades en el punto de uso.
- Evitar los sistemas de alta velocidad, ya que consumen más energía pero menos material.
- Usar sistemas de volumen de aire variable (y de convectores) para poder tener un control zonal.
- Reutilizar el calor de las partes del edificio que tengan exceso del mismo.
- Evitar el uso de sistemas que incorporen CFC (clorofluorocarburos) y HCFC (hidroclorofluorocarburos).
- Seleccionar un equipo que proporcione un rendimiento óptimo.
- Emplear el aire de salida para deshidratar el aire de entrada a través de un dispositivo simple sin partes móviles.
- Usar bombas de calor. Las bombas de calor, al ser reversibles, pueden utilizarse tanto para refrigerar en verano como para calefactar en invierno. Su rendimiento varía en función del sistema de condensación del gas (aire o agua) y de si se utiliza para producir calor o frío. Tipos:
 - Bombas de condensación de aire: Son las que tienen peor rendimiento, con el agravante del calentamiento del aire que produce en verano en el entorno de las máquinas de condensación. Por tanto, contribuyen a aumentar el efecto de isla de calor en las ciudades.
 - Bombas de condensación de agua: Son las que tienen un mejor rendimiento. Hay dos opciones:
 - Enfriar el agua a través de una torre de refrigeración. En la torre, el agua se pulveriza y se hace pasar una corriente de aire, con lo que se provoca la

evaporación de parte de esa agua y el consiguiente enfriamiento adiabático. Esta es la solución más eficiente energéticamente para producir frío pero hay una cierta resistencia a su implantación por el riesgo de contaminación del aire circundante por legionella. No obstante, existen protocolos eficaces para el tratamiento del agua de las torres de refrigeración que evitan dicho riesgo de contaminación.

- Enfriar el agua mediante un sistema de geotermia de baja temperatura, haciéndola pasar por un circuito enterrado en el subsuelo. Este sistema tiene un óptimo rendimiento en invierno, ya que el agua que se pone en contacto con el gas licuado ha pasado previamente por el subsuelo, llegando con una temperatura mayor que si se tomase del exterior, de entre 12 y 16°.

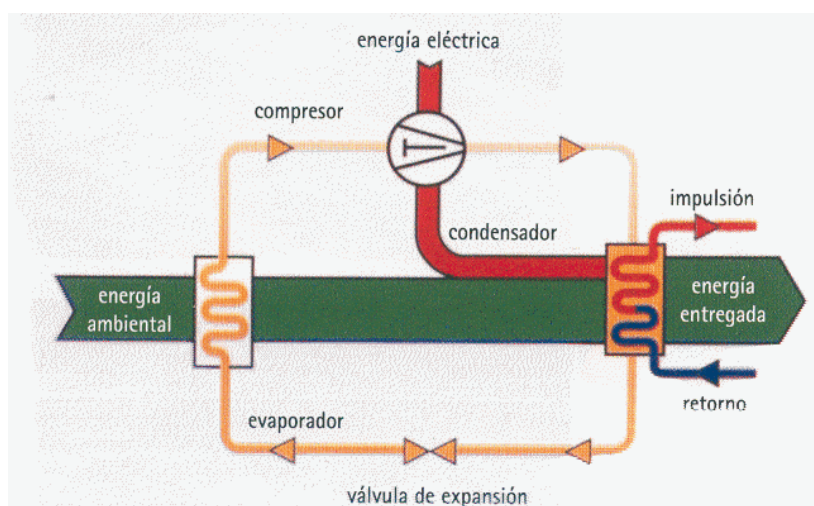


Fig. Principio de la bomba de calor

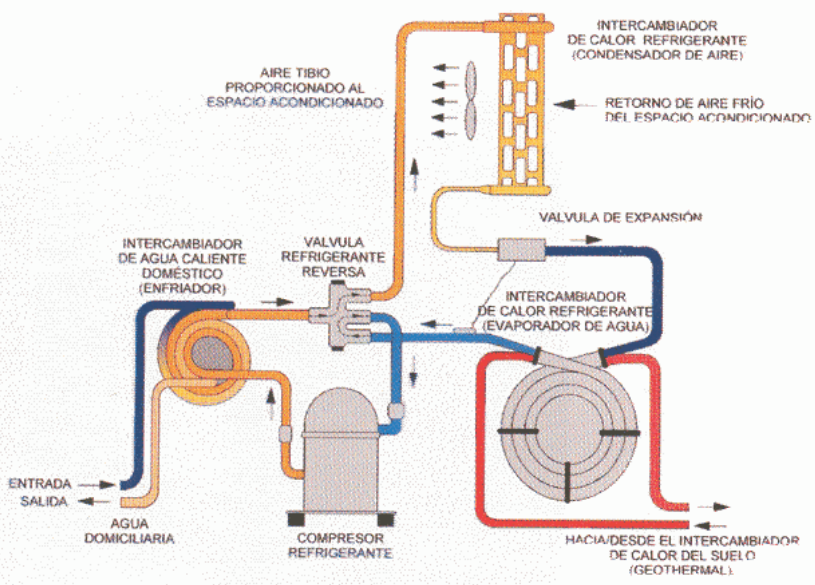


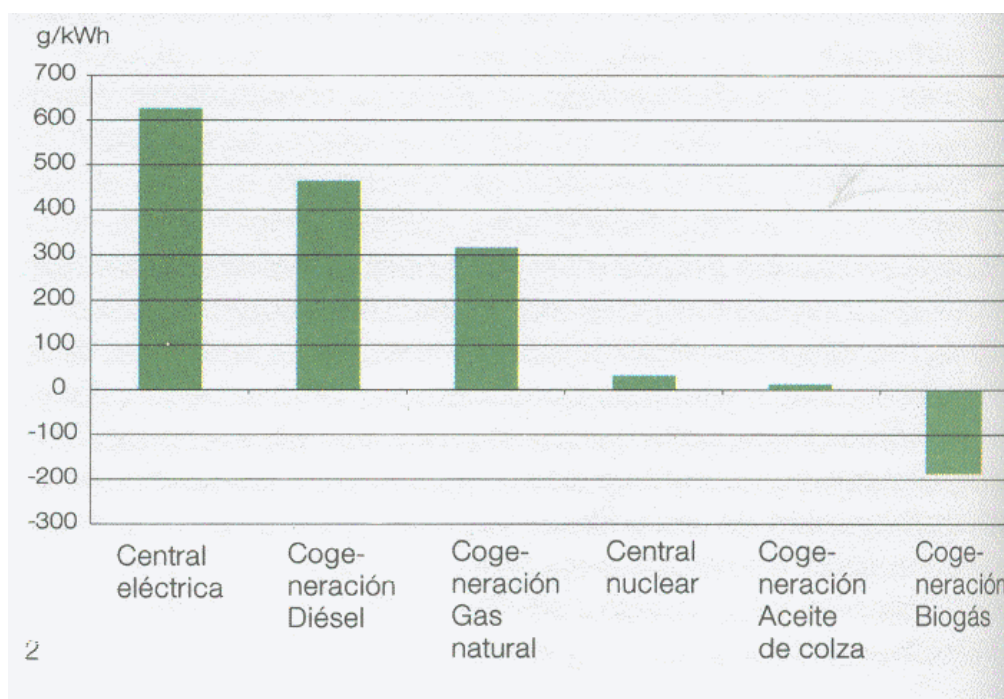
Fig. Esquema de bomba de calor con condensación por aire y apoyo de un intercambiador geotérmico.

5.3.3 SISTEMAS ACTIVOS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA POR COGENERACIÓN:

Son sistemas que generan de forma combinada calor y electricidad por medio del uso de combustibles. Las ventajas básicas de la cogeneración son las siguientes:

- ahorro de energía (eficiencia de los recursos)
- mayor compatibilidad medioambiental (menos emisiones)
- capacidad de usar tecnologías modernas más limpias (células de combustible, tecnología de gasificación)
- sostenibilidad (uso de fuentes de energía renovable)

En el siguiente gráfico se muestra el impacto medioambiental de la cogeneración comparado con la producción convencional de calor y electricidad.⁷¹



Se puede apreciar la clara ventaja de una unidad de cogeneración que funciona con gas, por ejemplo, sobre la generación separada: las emisiones de carbono se reducen prácticamente a la mitad. Si se usan combustibles renovables para el funcionamiento de la unidad de cogeneración, los logros obtenidos en la producción de calor térmico pueden incluso dar como resultado un balance global negativo de carbono. Cuánta energía se ahorra con la cogeneración: depende de la tecnología usada y del grado de eficiencia de las plantas eléctricas convencionales y los sistemas de generación de calor que producen electricidad y calor separadamente.

⁷¹ Suttor, Wolfgang. Cogeneración en edificios: *Detail Green*:2010, nº 7, p. 786

Un ejemplo de aplicación de este sistema en un rascacielos lo encontramos en la Torre del Banco de América, en Nueva York, de los arquitectos Cook & Fox. En este caso, la planta de cogeneración de 4,6 MW de gas se sitúa en la planta séptima, produciendo un tercio de las necesidades energéticas en períodos punta del edificio y casi el 70% de las necesidades energéticas anuales del edificio.⁷²

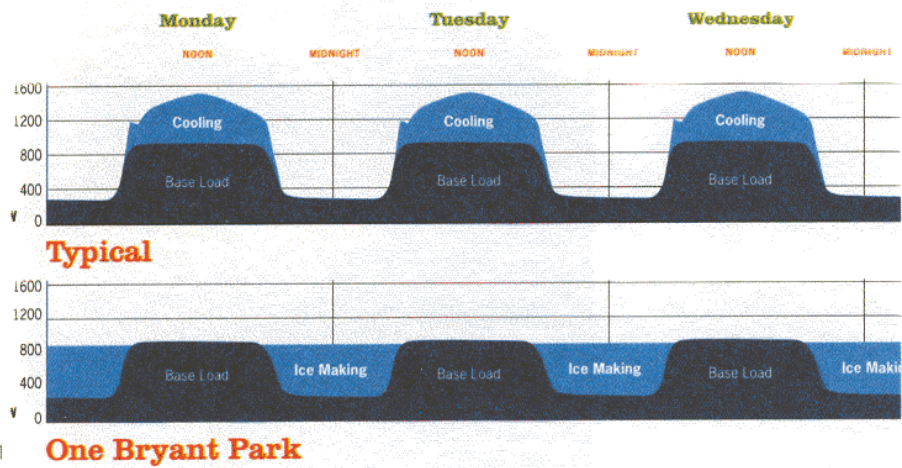
En las centrales eléctricas por combustión de carbón convencionales de EE.UU., hasta dos tercios de la energía puede desaparecer por la chimenea sin ser utilizados. Una planta combinada de calor y electricidad como la instalada en el Banco de América logra un nivel de eficacia mucho más elevado al explotar la enorme cantidad de calor latente en los gases liberados. Éste se utiliza para generar vapor para el funcionamiento de la máquina refrigeradora por absorción que suministra el aire acondicionado al edificio y produce agua caliente para calefacción y usos generales.

En EE.UU., el calor desechado como consecuencia de la producción de electricidad tan solo se ha explotado, hasta la fecha, en espacios industriales. En Alemania, por el contrario, este sistema de cogeneración de calor y electricidad forma parte de la normativa aplicable desde hace casi diez años y está bastante extendido.

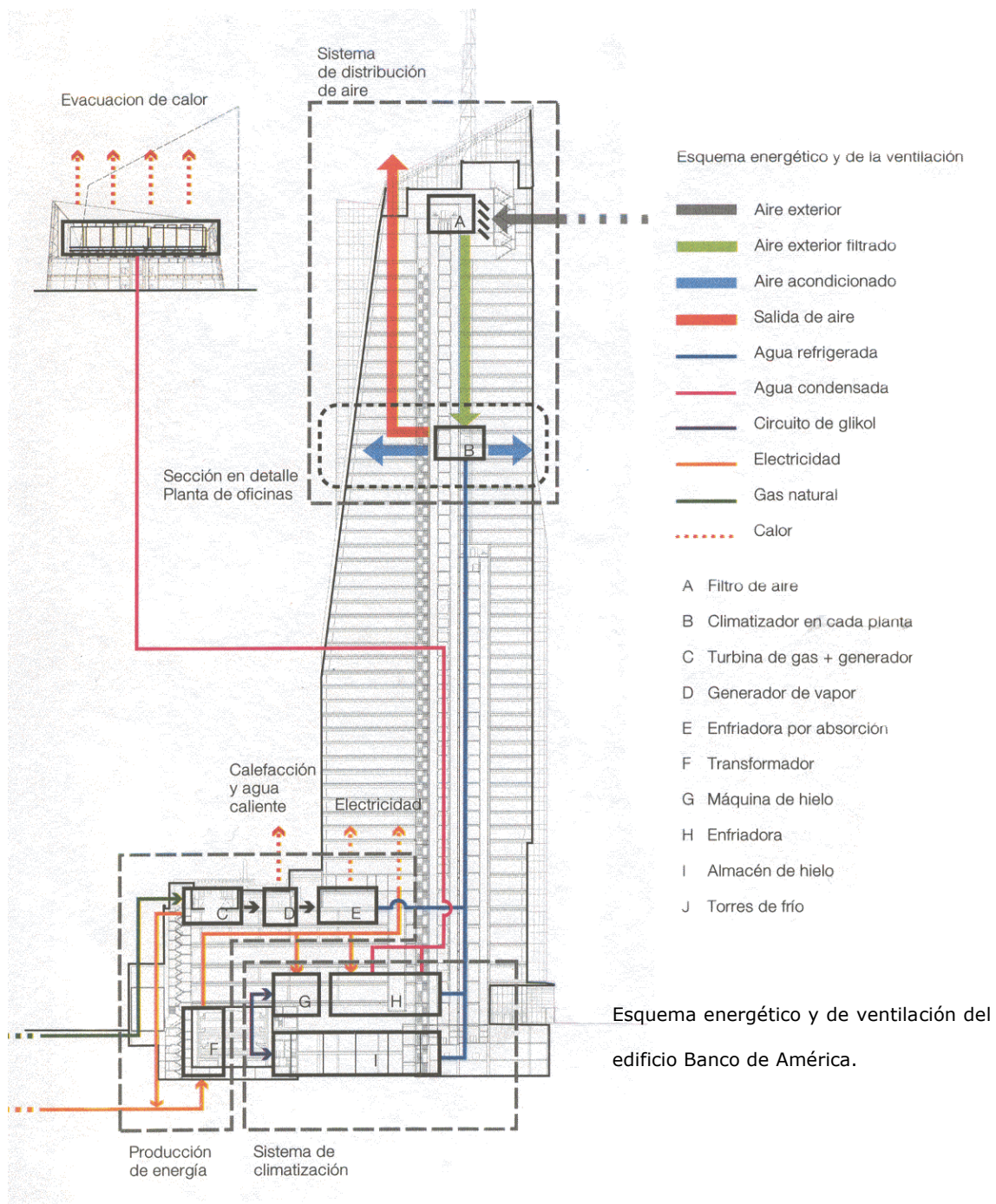
Otra de las grandes ventajas de este sistema radica en que la producción de energía se encuentra en el propio edificio. De esta forma, se reducen al mínimo las pérdidas energéticas transmitidas en el cableado por el efecto Joule, que habitualmente alcanzan el 7 u 8%.

El potencial económico y ecológico de la producción de electricidad no sólo radica en un uso eficiente del gas natural (un combustible relativamente inocuo en términos medioambientales) sino en la optimización temporal del uso de la electricidad. En el caso del Banco de América, la planta de cogeneración funciona 24 horas al día. Utilizando la económica electricidad de los períodos entre momentos punta durante la noche, la planta proporciona la electricidad necesaria para el enfriamiento. Cada noche se producen 227.000 Kg. de hielo usando espirales de glicol y se almacenan en 44 tanques de agua de gran tamaño. Durante el día, el agua fría se suministra a las máquinas de cada planta.

⁷² Arquitectura sostenible: Torre del Banco de América. *Detail Green*:2009, nº 7, p. 784



Esquema de consumo de energía y producción de hielo del edificio Banco de América y de otro convencional. Los picos de consumo durante el día se equilibran con la producción de hielo nocturna.



Esquema energético y de ventilación del edificio Banco de América.

5.4 SISTEMAS PRODUCTIVOS DE AHORRO ENERGÉTICO APLICABLES AL EDIFICIO EN ALTURA.

Son sistemas que generan energía in situ. Proporcionan una fuente de energía limpia, silenciosa y exenta de contaminación. Sin embargo, el principal problema que presenta la utilización de estos sistemas basados en fuentes de energía renovables es la naturaleza intermitente del suministro (luz y viento) y la dificultad de almacenar la electricidad generada. Principales mecanismos productivos de ahorro energético:

5.4.1 SISTEMAS DE CAPTACIÓN FOTOVOLTAICOS.

La generación de energía fotovoltaica consiste en la conversión directa de la energía solar en energía eléctrica mediante captadores fotovoltaicos. Para obtener un buen resultado del sistema se han de tener en cuenta factores relacionados con el entorno (latitud, insolación y radiación) que afecta a la orientación, inclinación, etc.; el dimensionado en función de las necesidades energéticas y el grado de mantenimiento del sistema. Los paneles fotovoltaicos no producen emisiones, ruido ni residuos (excepto al final de su vida útil). Su fabricación tiene costes medioambientales, pero la mayoría de sus materiales (aluminio, vidrio silicón) son reciclables, por lo que estos costes no son tan importantes.

La tecnología fotovoltaica permite convertir la energía solar en eléctrica en el mismo momento de captación para su consumo. Si el uso del edificio es oficinas, el suministro natural y la demanda energética estarán en relativa sintonía, pero si el uso es vivienda, hará falta que esta electricidad generada que no se consume sea enviada a la red de abastecimiento nacional, que funciona como un almacén de energía. El acceso a la red es fundamental para que el funcionamiento de un sistema fotovoltaico sea eficiente; de lo contrario, sería necesario contar con grandes y costosas baterías de almacenamiento.

Según Brian Edwards ⁷³, la eficiencia de los paneles modernos es de un 15% por módulo (es decir, que transforman el 15% de la energía primaria del sol directamente en electricidad), la vida útil media de un sistema fotovoltaico es de unos 20 años y la energía consumida en la fabricación de los paneles fotovoltaicos se recupera en cinco años de funcionamiento, por lo que la energía producida es equivalente a cuatro veces la necesaria para su fabricación.

⁷³ Edwards, Brian. *Guía básica de la sostenibilidad*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2ª ed. 2008, p. 76.

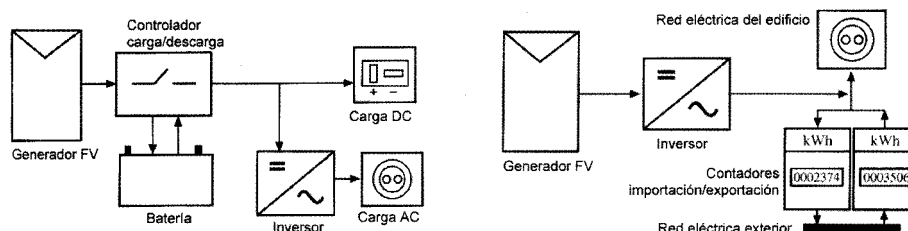
En el cuadro adjunto podemos ver la producción media anual de energía y las condiciones óptimas de inclinación y orientación en varias ciudades del mundo:

	Orientación		Angulo óptimo de inclinación	Producción de energía kwh/m2 año
	Longitud	Latitud		
Berlín	13	52	35	121
Londres	0	52	35	111
Madrid	-4	40	35	201
Lisboa	-9	39	30	201
Roma	13	42	35	191
Amsterdam	5	62	40	129
Ginebra	6	46	30	143
Cracovia	20	50	35	124
Oslo	11	60	45	180
Atenas	23	38	30	183
Ciudad de Méjico	-99	19	20	205
Viena	16	48	35	132
Estambul	29	41	30	176
Melbourne	145	-38	30	182
Miami	-80	26	35	220
Los Angeles	-117	33	30	233
Nueva York	-74	41	35	169
Seattle	-122	47	35	147
Buenos Aires	-58	-34	30	201
Ciudad del Cabo	18	-35	30	232
Tokio	140	35	30	149
Hong Kong	114	22	20	156
Moscu	56	37	40	119

Fig. Cuadro de la empresa BP sobre la producción media anual de energía con placas FV y las condiciones óptimas de inclinación y orientación en diversas ciudades del mundo. Fuente: ITEC ⁷⁴.

Descripción del sistema:

Las instalaciones fotovoltaicas (FV) pueden estar conectadas o no a la red eléctrica. Siempre que se pueda, se recomienda conectarlas a la red eléctrica, debido al ahorro que representa evitar componentes como baterías (obligatorios en sistemas autónomos) y a la posibilidad de vender a las compañías eléctricas la energía producida a un precio más alto que el de compra. Los sistemas FV están formados por los siguientes elementos básicos:



- a. Sistema aislado: captador FV, controlador de carga y descarga, batería, inversor
- b. Sistema conectado a la red: captador FV, inversor, contador de importación/exportación, red eléctrica

⁷⁴ Cuchí Burgos, A. *La cubierta captadora en los edificios de viviendas*. ITEC, Barcelona, 2002, p. 57.

Elementos captadores: Los captadores fotovoltaicos se componen de células fotovoltaicas encapsuladas en unos módulos de vidrio, o de vidrio y plástico, que las protegen del exterior.

a. Célula fotovoltaica: Éstas pueden ser monocristalinas, policristalinas o amorfas.

Las células de silicio amorfo tienen un rendimiento del 5-8% pero son muy fáciles de fabricar y más económicas que las de estructura cristalina.

La fabricación de células cristalinas (monocristalinas o policristalinas) es un proceso más caro, pero con un rendimiento mayor (12-17%) y se pueden conseguir texturas y colores más fáciles de integrar en la composición del edificio.

b. Módulo fotovoltaico: Tienen la función de proteger las células FV mediante una encapsulación con un vidrio frontal y una protección en la parte posterior.

Hay tres tipos de módulos:

b.1 Los módulos estándar: llevan un bastidor de aluminio y se utilizan principalmente en sistemas independientes o superpuestos a la piel del edificio.

b.2 Los módulos laminados o sin marco: más integrados en el diseño global del edificio.

b.3 Módulos especiales: Sustituyen elementos tradicionales de acabado (tejas solares, etc.) o elementos de sombra (persianas celosías, etc.)

Formas de colocación de los elementos fotovoltaicos en el edificio:

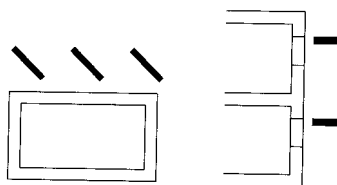
a. Sistemas de captación independiente:

Ventajas:

- Fácil montaje en techos planos y edificios ya construidos.
- El grado de inclinación puede ser óptimo.
- Estructura independiente de la estructura del edificio.

Inconvenientes:

- Impacto visual.
- No representa un ahorro económico en el uso de elementos constructivos.



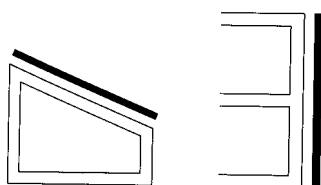
b. Sistemas de captación superpuesto:

Ventajas:

- Fácil montaje.
- Disminuye el impacto visual al situarse en un plano paralelo a la piel del edificio.
- La ventilación a través de la cara posterior del panel garantiza un buen funcionamiento.

Inconvenientes:

- El grado de inclinación está condicionado por la inclinación de la piel.
- No representa un ahorro económico en el uso de elementos constructivos.



c. Sistemas de captación integrado:

Son sistemas integrados en la piel del edificio y compuestos por elementos fotovoltaicos que sustituyen los materiales tradicionales de acabado.

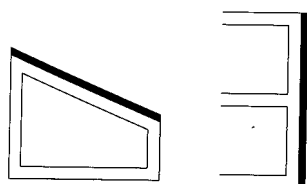
Ventajas:

- El ahorro económico que supone la sustitución de los materiales tradicionales de acabado por elementos fotovoltaicos permite rentabilizar la instalación en un plazo más corto.
- Es un sistema muy versátil, puesto que el elemento captador puede actuar como revestimiento de fachada, como elemento de cierre o elemento de sombra.

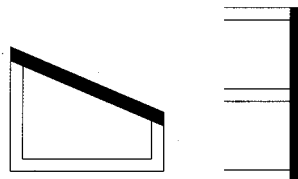
Inconvenientes:

- Han de ofrecer garantías de estanqueidad, durabilidad, etc. Similares a las de los materiales convencionales de acabado.

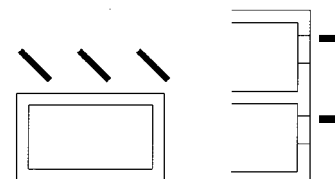
Elementos de revestimiento

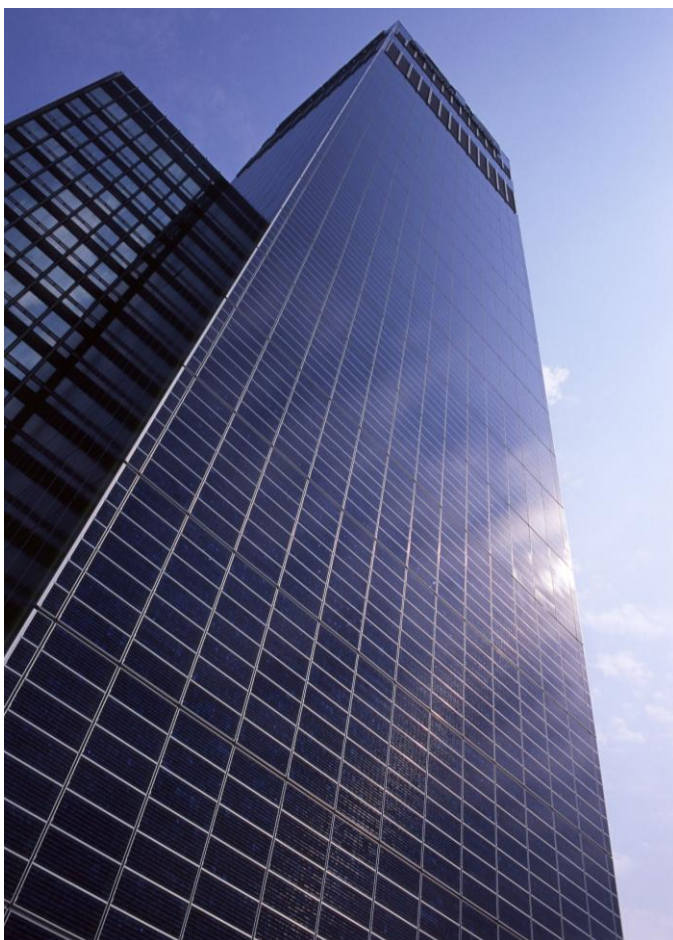


Elementos de cierre



Elementos de sombra





Fachada con paneles fotovoltaicos del edificio CIS en Manchester. Su fachada tiene 7244 paneles fotovoltaicos que generan 183 MWh al año, lo que le permite -junto a la instalación de 24 turbinas eólicas en su tejado- cubrir un 10% de su consumo.

5.4.2 SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA POR MEDIO DE TURBINAS.

Los sistemas de energía eólica permiten el aprovechamiento del viento para la generación de electricidad para el edificio. El uso de esta energía no es nada nuevo; en Mesopotamia, ya se utilizaban molinos de viento desde el 1700 A.C. para el riego.

Algunas instalaciones producen electricidad directamente, mientras que otras se utilizan para ventilar o bombear agua. Son un complemento muy bueno a los sistemas de energía solar, si tenemos en cuenta que los días ventosos suelen producirse cuando no brilla el sol. Por tanto, la combinación de generadores de electricidad mediante células fotovoltaicas y de aerogeneradores proporciona una autosuficiencia mucho mayor que la energía solar por sí sola. La energía eólica alcanza su punto de máxima producción cuando la demanda es más alta (invierno), al contrario que la energía solar, que se produce en verano, cuando es más baja.

El rascacielos, por la altura y escala que tiene, y los fuertes vientos a los que está sometido a grandes alturas, es un campo ideal para el desarrollo de este sistema de captación. Las turbinas eólicas que se pueden instalar varían desde los aparatos domésticos, que pueden producir 5 W, a las grandes turbinas, capaces de generar más de 1,5 MW. La mayor parte de las turbinas comerciales son de reducida dimensión, con una capacidad de unos 400W. Si combinamos varias turbinas pequeñas en un rascacielos obtenemos una eficacia mucho mayor que con una única turbina de mayor tamaño.



Ejemplo de integración de generadores eólicos en el rascacielos World Trade Center, de los arquitectos daneses Norwin y Ramboll, en Bahrain. El edificio está conformado por dos torres de 240 m. de altura cada una, conectados por tres puentes que alojan tres turbinas eólicas de 29 m. de diámetro cada una. Las turbinas son capaces de generar entre 1100-1300 MW al año, lo que equivale al 11-13% del consumo total energético del rascacielos. Fuente: www.bahrainwtc.com



Otro ejemplo de rascacielos con generadores de energía por medio de turbinas eólicas es el Strata Tower (148 m de altura, 2008, Londres) del estudio de arquitectura BFLS. Sus tres turbinas integradas en la cubierta del edificio son capaces de generar hasta un 8% de la energía que consumen los 408 apartamentos de viviendas del edificio. Fuente: www.stratalondon.com

