

Grado en Fundamentos de Arquitectura  
Universidad de Sevilla

## HACIA UNA SOLUCIÓN DE FACHADA TÉRMICA ACTIVA EN EDIFICIOS TERCIARIOS EN CLIMA MEDITERRÁNEO

*¿Puede la fachada de los edificios terciarios ejercer un papel como sistema térmicamente activo  
que pueda servir de alternativa a los sistemas de climatización dominantes?*

**Autor** Andrew Sabeti Díaz

**DNI** 49117596-S

**Tutor** Juan José Sendra Salas

**Equipo docente TFG-1**

Construcciones Arq. - Ing. Terreno – Estructuras de la Edificación

**Curso** 2015/16





# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO	
A. Relevancia y oportunidad	05
B. Motivación	08
C. Objetivos generales y específicos	09
2. ANTECEDENTES: ESTADO DEL ARTE	
A. Inicio de s.XX: <i>Le mur neutralisant</i> de Le Corbusier	10
B. Evolución de <i>le mur neutralisant</i> : propuestas a lo largo del siglo XX	15
C. Punto de inflexión: Crisis energética de la década 1970-80	19
I. Patentes	
II. Edificios	
III. Publicaciones científicas	
3. METODOLOGÍA	
A. Metodología documental	35
I. Estrategias pasivas para reducir ganancias solares	
II. Conclusiones derivadas de patentes y estudios	
B. Condiciones para las propuestas de fachadas	45
C. Propuestas de fachadas	46
4. CONCLUSIONES	53
5. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	55
6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	56
7. APÉNDICE	60



# 1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO

## *A. Relevancia y oportunidad.*

Existe una situación dominante actual en la forma de hacer arquitectura respecto a la relación de las instalaciones de climatización con el edificio, la cual se ha establecido a lo largo del siglo XX. Ésta es que los elementos de la envolvente térmica de la edificación forman los sistemas pasivos, siendo el sistema encargado de disminuir la demanda de energía de climatización. Mientras tanto el sistema activo, encargado de satisfacer la demanda de climatización y sobrellevando un consumo de energía, se ha conformado por la tecnología industrial, desembocando en el uso masivo de instalaciones de climatización en la edificación.

Hoy en día, en una búsqueda de la máxima eficiencia energética para los edificios, se ha llevado a cabo distintos procedimientos para poder disminuir la necesidad de consumo de energías primarias mundial.

Esta situación se vio azotada por la crisis energética mundial del año 1973, provocada en gran medida por el encarecimiento del petróleo debido al veto de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) de no exportar más petróleo ciertos países inmersos en la Guerra Fría entre Estados Unidos y la Unión Soviética. Aquellos países en los cuales su industrialización estaba ligada al consumo de petróleo fueron enormemente afectados, por lo que todo derivó en una gran crisis energética (Hobsbawm 1994). A partir de este momento se empezó a generar la conciencia de la necesidad de un crecimiento sostenible, de una regulación energética.

El ser humano ha seguido desde entonces, igualmente, una política de consumo desbordado y los recursos naturales empiezan a verse afectados. Según la asociación del Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF sus siglas en inglés) en una alerta lanzada en 2015 *“de mantenerse esta tendencia en 2050 sería necesario disponer de tres planetas como el nuestro para satisfacer la demanda”* (WWF 2015). Además sigue sin haber equidad energética mundial, llegándose a acuñar incluso conceptos como *“pobreza energética”*. Ante esta situación en la que la ciudadanía se encuentra de nuevo, se han redirigido los esfuerzos ya que existe una necesidad de crear una estrategia de crecimiento sostenible reformulando el concepto o la situación dominante mundial.

Desde el Consejo Europeo, y en el caso de Andalucía a través de la Junta de Andalucía, se está propiciando la implementación de una nueva estrategia de crecimiento inteligente, sostenible e integrado reunido en la Directiva 2012/27/UE. Según la Comisión Europea:

*“los edificios son responsables del 40% del consumo de energía y el 36% de las emisiones en la UE. (...) Actualmente, el 35% de los edificios en la UE tienen más de 50 años. Mejorando la eficiencia energética de los edificios, se puede reducir el consumo de energía total de la UE entre un 5-6% y disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> alrededor de un 5%”* (Comisión Europea 2016)

Con la directiva se pretende crear un marco europeo común para el fomento de la eficiencia energética. Una de las principales estrategias de esta directiva la explica el “Objetivo Triple 20”, con los siguientes objetivos:

- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% respecto al 1990 con el compromiso, bajo acuerdo internacional, de elevar el objetivo hasta el 30%.
- Alcanzar el 20% de uso de fuentes renovables en el consumo energético de la UE en 2020 y un 10% en el sector del transporte
- Aumentar la eficiencia energética con el fin de ahorrar un 20% del consumo energético de la UE respecto de las proyecciones para el año 2020.

Para poder avanzar en la consecución de los principales objetivos del “Objetivo Triple 20”, la Unión europea marca unas prioridades en las que deben de centrarse las estrategias:

- Eficiencia energética.
- Consolidación e integración del mercado europeo de la energía.
- Desarrollo y promoción de tecnologías energéticas.
- Facilitar el acceso a un suministro competitivo y seguro de energía.
- Potenciar las relaciones internacionales.

En el caso de España el consumo energético asociado a la edificación, tal y como muestran las gráficas realizadas por IDAE, supone el 20% del total. De este porcentaje el 38% está relacionado con edificios terciarios y un 62% con viviendas. (IDAE, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2015).

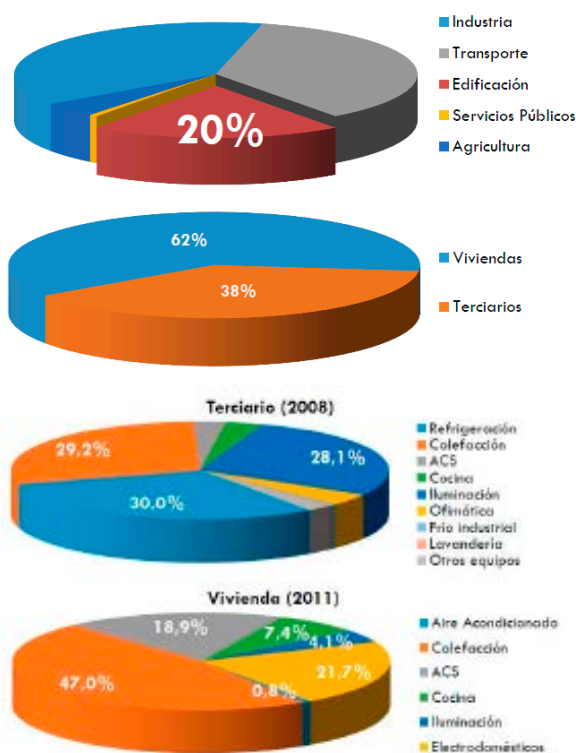


Fig. 1: Diagrama de distribución y consumo energético en España (IDAE, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2015)

Fig. 2: Diagrama de consumo energético en edificios terciarios (2008) y de vivienda (2011) en España (IDAE, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2015)

Según la directiva europea, las normas nacionales deben:

*“(...) establecer las reglas y procedimientos que permiten cumplir las exigencias básicas de ‘Ahorro de energía’. El objetivo del requisito básico de ‘Ahorro de energía’ consiste en conseguir un uso racional de la energía necesaria para la utilización de los edificios, reduciendo a límites sostenibles su consumo y conseguir, asimismo, que una parte de este consumo proceda de fuentes de energía renovables” (Directiva Europea 2012)*

En el marco normativo nacional, estas exigencias básicas se han ido implementando con la revisión y modificación del Código Técnico de la Edificación, más concretamente en el Documento Básico (DB) de Ahorro de Energía que *“tiene por objeto establecer reglas y procedimientos que permiten cumplir las exigencias básicas de ahorro de energía”* (CTE 2016). Con el desarrollo a lo largo del tiempo de este documento, el CTE-DB-HE, se han ido estableciendo las limitaciones o condiciones que deben de tener las edificaciones, con unas características establecidas, para cumplir tanto la directiva europea como los distintos criterios en cuanto a ahorro de energía decididos a nivel nacional. Los capítulos en los que se ha desarrollado estos criterios son los siguientes:

- HE-0: Limitación del consumo energético.
- HE-1: Limitación de la demanda energética.
- HE-2: Rendimiento de las instalaciones térmicas.
- HE-3: Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación
- HE-4: Contribución solar mínima de ACS.
- HE-5: Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica.

Adicionalmente al desarrollo de la directiva europea en el marco normativo nacional a través del Código Técnico de la Edificación (CTE), también se creó un Real Decreto en 2013, por el que se introdujo el concepto de “calificación energética”. En el mismo se asegura que *“la certificación energética no es un fin en sí mismo, sino un medio para alcanzar el objetivo”* (Ministerio de Industria 2013). Se estimaba que su puesta en práctica conducirá a un ahorro del 20% respecto del consumo actual (Ministerio de Industria 2013).

La calificación energética es una expresión del consumo de energía de un edificio y sirve para introducir dentro del marco normativo nacional, el concepto nZEB: near ZERO ENERGY BUILDINGS o edificios de consumo de energía casi nulo. En la directiva europea, se exigía que los edificios nuevos de titularidad pública construidos a partir del 31/12/2018 sean edificios nZEB y que los edificios nuevos construidos a partir del 31/12/2020 también lo fueran (Parlamento europeo y Consejo de la Unión Europea 2012). Este concepto, el cual queda un poco abstracto en la directiva, con la intención de que el marco normativo nacional lo resuelve, se concretiza en España a través de las calificaciones energéticas, considerando que un nZEB tendrá una calificación energética A (Ministerio de Industria 2013).

La realidad energética mundial, europea y española, por tanto, demanda una reformulación de los sistemas pre-establecidos; surgiendo alrededor a la nueva tendencia muchas opciones de investigación y aplicación para reducir drásticamente el consumo de energía mundial y, más concretamente, en el sector de la edificación.

Ante este panorama, con la existencia de un sistema dominante de climatización descrito al inicio de este apartado, se considera de gran interés el estudio de las posibilidades que supondría una alteración del mismo. El estudio ve la oportunidad de profundizar en el análisis de las ventajas de que la envolvente térmica ejerciera un papel como sistema térmico activo, ayudando o convirtiéndose en alternativa a los sistemas de climatización.

Según Xavier Ferrés (Ferrés et al. 2013) la envolvente de un edificio es el elemento que separa el interior del exterior y además actúa como interfaz entre el edificio y el medio urbano. Sus funciones más importantes son protegerse de los agentes climáticos como el frío, el calor, la lluvia y el viento, y de definir el volumen y crear un ambiente acogedor. Como parte de esta envolvente, la fachada es tanto la cara pública de un edificio como un elemento del medio urbano. En el caso de los edificios terciarios, el consumo de energía para climatización (refrigeración y calefacción) es de casi un 60% (IDAE, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2015), por lo que resulta de gran interés poder centrarse en las distintas opciones de su envolvente térmica, más concretamente de sus fachadas, las cuales suelen ser fachadas basadas esencialmente en el muro cortina en los edificios de oficina, elemento de relevancia crítica en las ganancias y pérdidas de cargas térmicas del conjunto.

### *B. Motivación.*

Existe un amplio desconocimiento de las posibilidades y de la aplicación de envolventes térmicas como sistema activo del acondicionamiento de edificios, cambiando el paradigma actual. Para intentar solventarlo se realiza este trabajo de investigación con la idea de que pueda servir de guía, o de base informativa, sobre las posibilidades del uso de fachadas como sistema activo térmico alternativo.

Los estudios realizados en este campo están referenciados y comprobados en clima continental mayoritariamente, donde el problema crítico en los edificios de oficina con muros cortina son las pérdidas energéticas que se producen en invierno. Las estrategias seguidas para tener fachadas activas van dirigidas hacia limitar esas pérdidas o maximizar las ganancias de energía solas durante las horas de sol.

Sin embargo, el clima mediterráneo tiene características diferentes, entre las que destacan días con muchas horas de sol siendo el principal problema para el acondicionamiento de los edificios de oficinas las ganancias térmicas producidas en verano, elevándose, en consecuencia, considerablemente el consumo de energía para refrigeración. Conseguir reflexionar sobre las posibilidades de estos sistemas en el clima del sur de Europa, más concretamente de España, es una posibilidad a tener en cuenta.



Esto, además, abre la oportunidad de acercarse más al oficio del arquitecto el acondicionamiento de las edificaciones, pudiéndose proyectar un sistema de fachada del edificio que evite o reduzca la necesidad de introducir instalaciones de climatización como solución, elemento adoptado a principios del s. XX desde el mundo de la industria.

### *C. Objetivos generales y específicos.*

#### *Objetivo general.*

Estudiar la capacidad que pueden tener las fachadas de edificios terciarios para tener un papel térmicamente activo, hasta llegar a servir de alternativa a los sistemas de instalaciones de climatización.

#### *Objetivos específicos.*

- Análisis de las principales propuestas y resultados sobre sistemas de fachadas activas en la literatura científica.
- Análisis de la implicación que tendría la aplicación de algunas de ellas en un edificio terciario de oficinas en clima mediterráneo.
- Efectuar una propuesta de fachada como sistema térmico activo para un edificio de oficinas adaptado al clima mediterráneo.

## 2. ANTECEDENTES: ESTADO DEL ARTE

### A. Inicio del siglo XX: *Le mur neutralisant* de Le Corbusier.

Desde principio del siglo XX, con el movimiento moderno, el cual tenía como paradigma de la nueva arquitectura, entre otras cosas, la desmaterialización las fachadas, las cubiertas y la estructura, se empezaron a buscar soluciones que cumplieran las antiguas prestaciones de aislamiento acústico, térmico, privacidad, etc. las cuales se habían perdido conforme éstas perdían masividad.

Uno de los primeros pensadores sobre esta nueva sensibilidad ante la arquitectura del vidrio, surgidos a finales del s. XIX y principios del XX, fue Paul Scheerbart, que estableció una visión de una arquitectura futura de vidrio, acero y luz (Banham 1975):

*“La mayoría de nosotros habita espacios cerrados. Estos forman el medio en el cual se desarrolla nuestra cultura. Nuestra cultura es un producto exacto de nuestra arquitectura. Si nosotros deseamos elevar nuestra cultura a un nivel más alto, debemos por lo tanto cambiar nuestra arquitectura. Y esto sólo será posible cuando suprimamos el sentido de encierro de los espacios donde vivimos. Esto sólo lo lograremos introduciendo la Arquitectura de Vidrio que permitirá que la luz de la luna y de las estrellas brillen en la habitación, no a través de un par de ventanas, sino, tanto como sea posible, a través de paredes enteras de vidrio coloreado. El nuevo medio así creado nos traerá una nueva cultura”* (Scheerbart 1914)

Sin embargo, el mismo Scheerbart se lamenta que las interesantes soluciones vidriadas no estén doblemente vidriadas para prevenir una excesiva pérdida o ganancia de energía o calor (Banham 1975):

*“Puesto que el aire es uno de los peores conductores del calor, toda la arquitectura de vidrio necesita esta doble pared. Los dos planos de vidrio pueden estar separados un metro o aún más. (...) Los edificios de vidrio son convenientes solamente para las zonas de clima moderado, no en las áreas polares o ecuatoriales (...)”*. (Scheerbart 1914)

Con la llegada del movimiento moderno, la utilización de la pared total de vidrio fue resultado lógico para aprovechar al máximo la entrada de luz natural; aunque el entorno ambiental provocara graves ganancias de sol en verano en climas cálidos o pérdidas igualmente graves en invierno en climas fríos (Banham 1975).

Hasta el año 1927, Le Corbusier, usa frecuentemente el *pan de verre* en las ventanas de las estancias tipo estudio, las cuales estaban orientadas hacia el Norte, para hacer que la ganancia de calor a través de estas ventanas sea casi despreciable, aunque en cambio, se intensificaba la pérdida de carga térmica en invierno, debido a la alta transmitancia térmica del vidrio.

En el proceso de desmaterializar la fachada<sup>1</sup> Le Corbusier es consciente de la pérdida de las ventajas de las antiguas soluciones masivas (capacidad térmica, aislamiento térmico, privacidad visual, aislamiento acústico), las cuales debía de suplir o implementar en las nuevas soluciones propuestas. Esta característica se refleja en sus bocetos e ideas para el proyecto Centrosoyuz en Moscú, proyectado en 1928, que no llegó a ser construido. En este proyecto, Le Corbusier empieza a enunciar las primeras ideas respecto al acondicionamiento que les servirán como antecedentes para plantear *la respiration exacte* y *le mur neutralisant*. (Banham 1975)

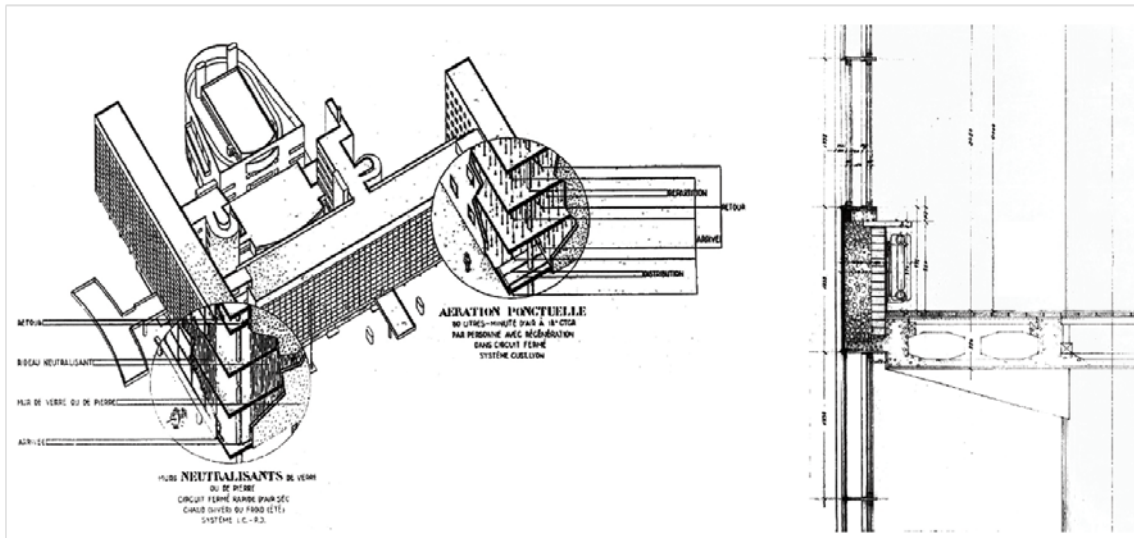


Fig. 03: Detalles del proyecto Centrosoyuz (Le Corbusier 1928)

Tras esto realiza 2 edificios, en los que sus paredes completamente acristaladas ya no están orientadas siguiendo el sentido común del soleamiento y la habitabilidad de los espacios interiores: el Pavillon Suisse y la Cité de Refuge. Así como el emplazamiento de la Cité de Refuge le daba pocas opciones en cuanto a su orientación, el Pavillon Suisse estaba desprovisto de condicionantes del entorno en el emplazamiento, sin embargo se decide tomar la decisión de colocar las paredes vidriadas casi exactamente hacia el sur.

En este proceso de cambio de paradigma que es planteado por Le Corbusier, siendo el primer individuo de relevancia en iniciarlo, proyectó dos elementos singulares, los cuales son visibles sobre todo en la Cité de Refuge, siendo una de las primeras referencias de elementos que ayudan al manejo del entorno ambiental: *la respiration exacte* y *le mur neutralisant*.

La primera solución *-la respiration exacte-* no es sino un elemento que ayuda al acondicionamiento del aire interior, asociado al concepto de ventilación y renovación del aire, mientras que en el segundo concepto *-le mur neutralisant-* encontramos uno de los primeros precedentes de fachada activa, ya que se trataba de una pared neutralizadora,

<sup>1</sup> "...que ahora una casa puede ser hecha con unos pocos pilares de hormigón armado...dejando entre ellos claros totales... ¿Qué tiene de bueno, yo pregunto, llenar de nuevo este espacio, cuando me ha sido dado vacío?" Le Corbusier, citado en (Banham 1975)

conformada con un doble vidrio con aire frío o caliente, dependiendo de las condiciones climatológicas, circulando por la cámara generada entre ambas capas de vidrio simple de forma que se acondicionara la temperatura interior. Le Corbusier explicaba así un elemento que se refería a él –*le mur neutralisant*– como “*nôtre invention*”:



*“Habíamos estado buscando una oportunidad, y ella llegó: el hogar “Cité de Refuge” para el Ejército de Salvación. Seiscientas almas pobres, hombres y mujeres, viven allí. Nosotros le dimos libremente la inefable alegría de la plena luz solar. Mil metros cuadrados de pared vidriada iluminan cada cuarto de piso de suelo a techo, de pared a pared (...), el vidrio estaba sellado herméticamente, porque el aire filtrado y caliente circula constantemente en el interior, controlado por los calefactores y ventiladores” (Le Corbusier 1937)*

Fig. 04: Esquema descriptivo el muro neutralizante (Le Corbusier 1928)



Fig. 05: Fachada de vidrio de la Cité de Refuge. (Benton y Cohen 2008)

Le Corbusier, sin embargo no pudo ejecutar las soluciones planeadas completamente en la Cité de Refuge, fundamentalmente por razones de economía, y la fachada finalmente

construida no se trataba de un muro neutralizante, sino una fachada acristalada conformada por un único vidrio simple. Estos fueron los motivos que provocaron una ganancia térmica solar, ya que las condiciones de fachada iniciales sí que suponían un sistema de control. Ante la necesidad de mejorar la situación se introdujeron brise-soleil o protecciones solares en la fachada sur de la Cité de Refuge.

A pesar del fracaso de la Cité de Refuge, Le Corbusier seguía convencido en la utilidad en crear sistemas sellados herméticamente (Banham 1975) como solución a los problemas interiores, ya que esta era la forma más práctica de garantizar un acondicionamiento interior adecuado y en la creación de sistemas activos de fachada que sirvieran de control ambiental del edificio creando el confort ambiental requerido:

*“Yo no caliento el edificio ni el aire. Pero una abundante corriente de aire puro circula a 18°C en la proporción de 80 litros por minuto y por persona. Y he aquí la segunda parte de la operación. ¿Cómo, pregunta usted, mantiene el aire su temperatura mientras se difunde a través de los ambientes, si afuera hace 40° por encima o por debajo de cero?*

*Respondo: hay murs neutralisants (nuestro invento) para mantener el aire a 18°C, soportando cualquier influencia externa. Estas paredes están previstas de vidrio, piedra, o materiales mixtos, y consisten en una doble membrana con un espacio de pocos centímetros entre ellas (...) un espacio que rodea el edificio por debajo, que sube con las paredes, y por sobre la terraza del techo.*

*Otra planta térmica es instalada para la calefacción y enfriamiento, dos ventiladores, uno que circula y otro que aspira; otro circuito cerrado.*

*En el estrecho espacio entre las membranas sopla el aire caliente abrasador, si estamos en Moscú, o el aire helado, si estamos en Dakar. Resultado: nosotros controlamos las cosas de tal manera que la superficie de la membrana interior conserve los 18°C ¡Y allí está usted!*

*(...) Los edificios de Rusia, París, Suez o Buenos Aires, el barco que cruza el Ecuador, serán cerrados herméticamente. Calentados durante el invierno, enfriados en verano, lo cual significa que el aire puro y controlado a 18°C circula en el interior para siempre.”<sup>2</sup>*

Aquí Le Corbusier recoge los problemas que ya había vaticinado Scheerbart con los climas más extremos, pero sigue confiando en la sostenibilidad de la solución propuesta. Para ello, Le Corbusier, decidió realizar pruebas al sistema formado por el muro neutralizante y la respiración exacta, en unos laboratorios de la compañía de vidrios Saint Gobain, para comprobar su funcionamiento, bajo la supervisión de Gustave Lyon. Este

---

<sup>2</sup> Le Corbusier, citado en (Banham 1975)

estudio fue una decepción en cierta medida, ya que los técnicos concluyeron que para que el muro neutralizante tuviera cierto efecto sería necesaria una tercera capa de vidrio, con una cámara de aire sin circular (Banham 1975). Gustave Lyon, sobre este complejo prototipo cerrado conectado a los sistemas del muro neutralizante y la respiración exacta, calculó que hacía falta un aire impulsado de 60l/s por la cámara activa entre ambas capas de vidrio con un salto térmico de 10°C entre la temperatura interior de la habitación y la temperatura del aire de la cámara: haría falta, por tanto, impulsar a la cámara un aire a 15°C en verano y de 30°C en invierno. G. Lyon también estableció un caudal para la respiración exacta de 83,33l/s y 291,66l/s para invierno y verano, respectivamente. Con estos datos y suponiendo que el aire de ventilación incorporado por la respiración exacta se introdujera en condiciones neutrales (20°C en invierno y 25°C en verano) los valores obtenidos estaban entre las recomendadas para confort térmico: alrededor de 21°C en invierno y 25°C en verano (Ramírez Balas, Suárez, y Sendra 2013).

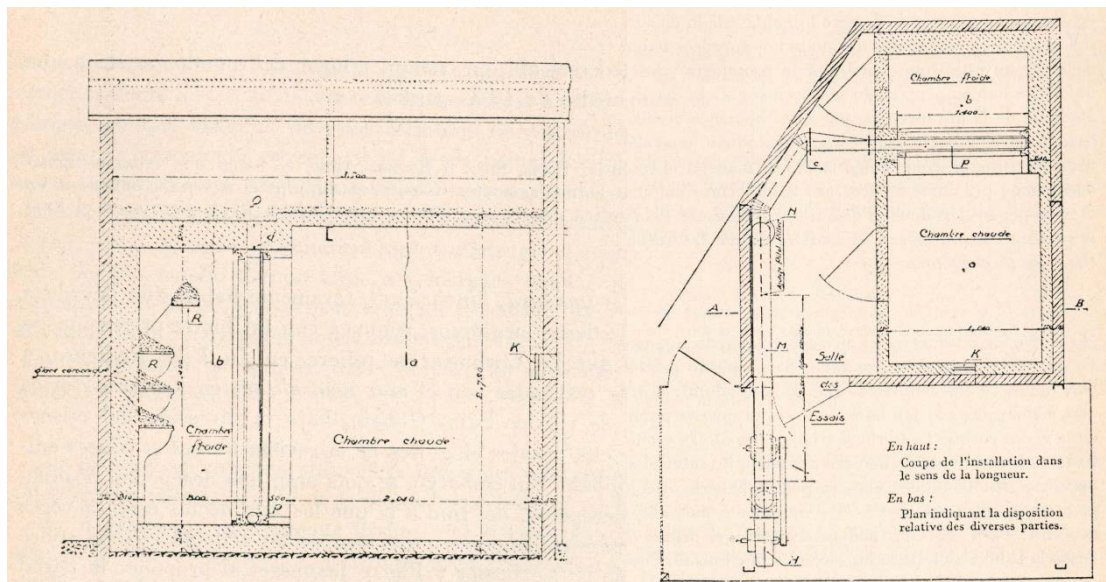


Fig. 06 y Fig. 07: Cámara de prueba para el mur neutralisant y la respiration exacte en Saint Gobain, 1931. Sección y planta. (Banham 1975)

Finalmente la idea de fachada térmica activa, el muro neutralizante, fracasó por diversos motivos entre los que destacan los económicos, las dudas técnicas que despertaron los estudios sobre los prototipos y el auge y consolidación en el sector de sistemas de instalaciones activos propuestos por ingenieros americanos, encabezados por W. Carrier.

Se confrontaron dos movimientos: uno, el americano, en el que se superponían la tecnología industrial a los edificios para su acondicionamiento y otro, iniciado por Le Corbusier, que pretendía complementar el papel tradicional de la fachada como separador entre el ambiente exterior y el interior. La industria del aire acondicionado triunfó, generalizándose su uso doméstico a lo largo del s. XX, siendo desde entonces el sistema dominante hasta finales del s. XX y principios del XXI, donde los sistemas de fachadas activos y de fachadas de doble piel empezaron a retomarse.



### *B. Evolución de le mur neutralisant: propuestas a lo largo del siglo XX.<sup>3</sup>*

Con la consolidación del uso de los sistemas de aire acondicionado para el control de la temperatura, la humedad, la pureza y la velocidad del aire del interior de los edificios, se produjo un período en el que se experimentó muy poco usando como referencia la combinación de la respiración exacta y el muro neutralizante de Le Corbusier.

Paralelamente a que Le Corbusier ideara estos sistemas de control térmico para el Centrosoyuz y que los intentara experimentar en la Cité de Refuge, Moisei Guinzburg, influenciado por Le Corbusier (Ramírez Balas, s. f.), realiza el proyecto para la “Casa Comuna Narkofin” entre 1928 y 1932, experimentando también con el doble acristalamiento con cámara, ocupando grandes superficies en sus fachadas.

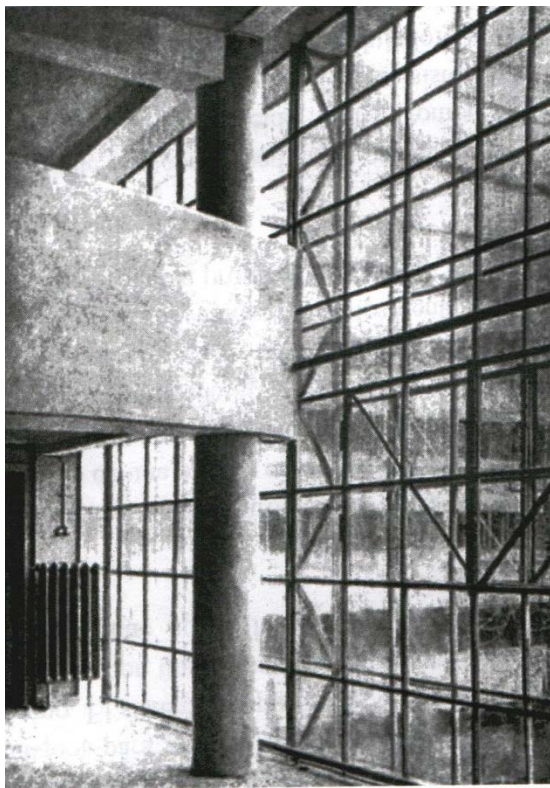


Fig. 08: Casa Comuna Narkofin, 1932  
(Ramírez Balas, s. f.)

En la década de los años 30 surge en Chicago, principalmente, un sistema denominado “Thermopane”, conformado por dos hojas de vidrio estancas con cámara de 12mm de espesor. Este sistema fue estudiado por la empresa encargada de su fabricación, tratando de comprobar su funcionamiento como sistema de protección solar, en el Instituto Tecnológico de Illinois. Según Cristina Ramírez Balas *“este trabajo supuso una primera exploración sobre la utilización del diseño solar pasivo, teniendo en cuenta múltiples acristalamientos, la importancia de la orientación sur, así como los efectos del uso de ocupantes, la inercia térmica y la importancia de la ventilación y las infiltraciones no controladas”* (Ramírez Balas,

---

<sup>3</sup> Cronología de desarrollos basado en el capítulo 4.4 de la tesis en elaboración de Cristina Ramírez Balas (Sevilla). Aportada, por la citada autora, para la elaboración del presente TFG a su autor.

s. f.). El sistema "Thermopane" se implementó en las "casas solares" de G.F. Keck, H. Wright Jr. y H. Armstrong.



The American Store Co., St. Louis, Missouri, designed by architect Harris Armstrong, Kirkwood, Missouri. He enclosed the entire first floor, and the north side, in Thermopane insulating glass to assure comfort and greater use of floor space near windows in winter.



## HOW WIDE IS THIS ROOM ?

Measured in feet, this is a long, narrow room. Measured by the eye, it is comfortably wide. This effect has been created by the architect. He introduced into the room maximum daylight and view by means of a Daylight Wall of Thermopane® insulating glass.

Note how clear flat glass has been used from wall to wall and from window sill to ceiling. This creates a sense of unity between the indoors and outdoors, makes the room seem larger because the ceiling seems to merge with the sky. This principle of uninterrupted ceiling lines is being widely applied in other types of modern buildings.

To achieve this illusion of spaciousness, clear glass must go all the way up. Any non-transparent material presents a barrier to the eye.

Daylight Walls have an economic advantage which

comes as a plus to the psychological benefit. They are low in cost. No matter what type of building you may be considering—office, school, factory or hospital—compare construction costs of clear glass walls with those of other kinds of walls. Then add these advantages: glass needs no interior finishing, encloses a building quickly, and provides light and view. But the benefit to consider above all others is—people love the wide-open feeling of Daylight Walls.

For Thermopane literature and a copy of "Daylight Engineering for Schools", write Libbey Owens-Ford Glass Co., 4141 Nicholas Bldg., Toledo 3, Ohio.



## DAYLIGHT WALLS

THAT DON'T OBSCURE VISION

THERMOPANE • PLATE GLASS • WINDOW GLASS

Ad No. NR-106—This advertisement appears in:

Time—May 7, 1951  
Newsweek—April 23, 1951

FOR WINDOW INSULATION, THERMOPANE® insulating glass is widely and successfully used. THERMOPANE with 1/2" of dry air hermetically sealed between two panes has twice the insulating value of single glass. This minimizes chilliness, drafts and heat loss of windows in winter. THERMOPANE cuts air conditioning costs in summer by reducing the amount of heat entering.



Fig. 09: Sistema Thermopane, anunciado como "Daylight Walls" (Ramírez Balas, s. f.)



Posteriormente, en Europa y en la década de los 50, se realizaron estudios de circulación, flujos de aire y cámaras estancas de aire entre dos capas de acristalamiento, a través de procesos mecánicos. Con esto se pretendía mejorar el acondicionamiento térmico, especialmente en condiciones de calor extremo en verano (Ramírez Balas, s. f.). La aplicación de este sistema en el Banco de Copenhague llevaba incorporadas persianas venecianas en la cámara de 75mm. En 1957 surge en Suecia la primera patente relacionada con flujo de aire en ventanas y posteriormente la compañía Ekono construye en Helsinki un edificio de oficinas acristaladas con doble acristalamiento y cámara de aire con un flujo del mismo. Este sistema, del año 1967, lo conformaban doubles ventanas conectadas mecánicamente por un único marco llevando protecciones solares adicionales en su interior.

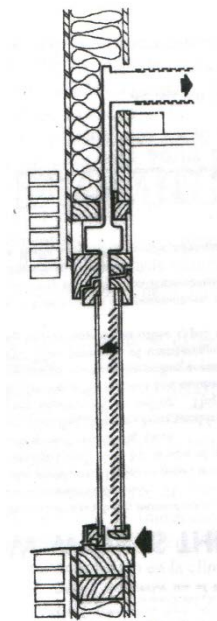


Fig. 10: Detalle del cerramiento del Banco de Copenhague, 1950  
(Ramírez Balas, s. f.)

Félix Trombe popularizó en la década de los 60 el ignorado diseño patentado por Edward Morse en 1881, tras haberlo usado en las casas solares pasivas que diseñó junto al arquitecto Jacques Michel en Francia. El conocido como “Muro Trombe” se trata de un sistema de doble piel como medida de captación y acumulación de energía solar pasiva, conformado por una capa interior de albañilería, una intermedia de un elemento captador y acumulador de energía solar -como una chapa negra- y un vidrio exterior. Sobre el muro se le practicaban unos conductos en la parte superior e inferior, de forma que se pudieran abrir o cerrar para generar circulaciones convectivas de aire que facilitaran la disipación de energía del muro o que ayudaran a la acumulación en él, para posterior emisión del calor al interior del recinto. En condiciones de invierno, el aire del interior atraviesa la cámara con la capa metálica, entrando por el inferior del mismo y saliendo por los orificios superiores, ya calentado. En condiciones de verano, bastaba con abrir las aberturas totalmente al exterior, para que el muro disipara su calor rápidamente, evitando así la acumulación de la energía en él.

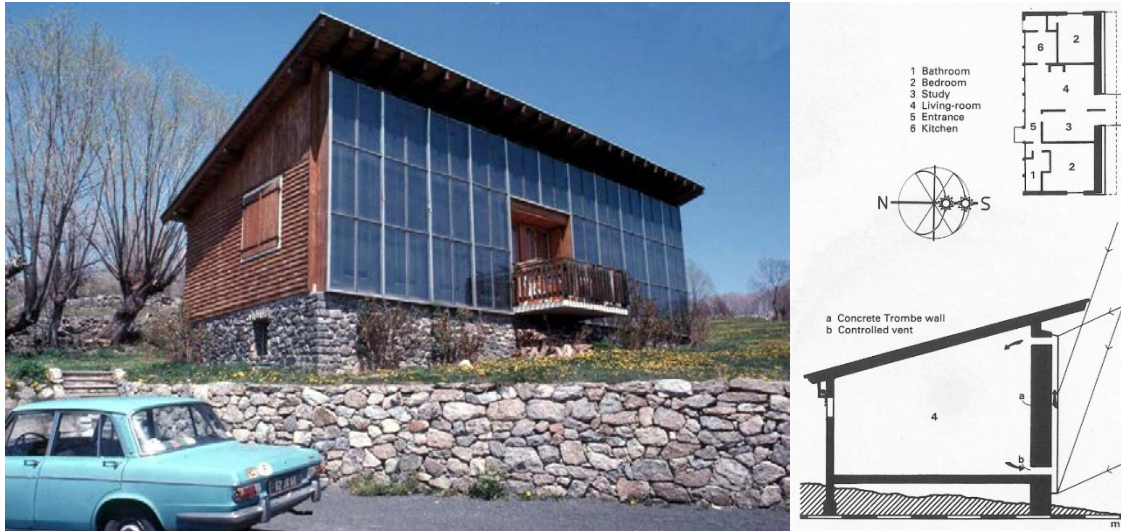


Fig. 11 y Fig. 12: Casa Solar en Odellio, Francia. Diseñada por Félix Trombe, incorporando el sistema del Muro Trombe, 1960. Fotografía y esquema del sistema. (Jjurreidini 2016)

Uno de los edificios de oficinas con una gran superficie vidriada, que tomaron los principios expuestos por Le Corbusier y le dieron una aplicación contemporánea, fue el proyecto para la central de la "Scottish Widows and Life Assurance Society" en Edimburgo, realizadas en el año 1962 por el arquitecto Basil Spence. En ellas, el muro acristalado tenía un funcionamiento más complejo, estando conectado al sistema de impulsión de climatización. En invierno, las pérdidas térmicas por tener fachadas acristaladas no se evitaban, pero en verano, la ventilación y el paso del aire climatizado por el doble acristalamiento reducía drásticamente los efectos de las ganancias solares (Ramírez Balas, s. f.).

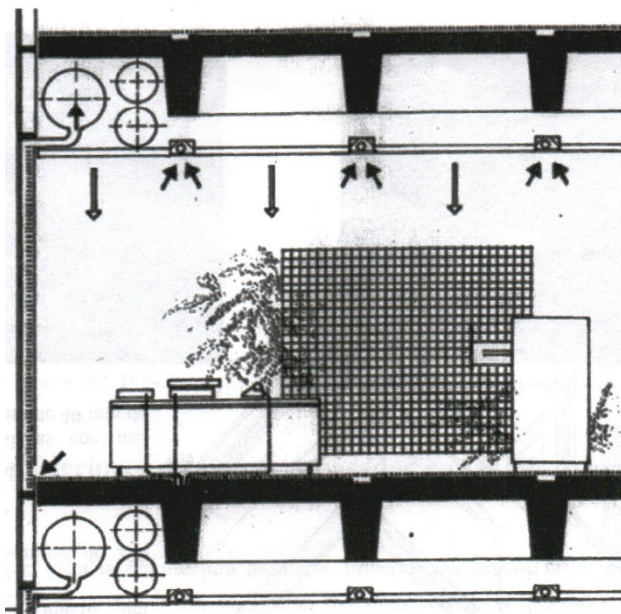


Fig. 13: Detalle del funcionamiento del Scottish Widow Headquarters, 1962 (Ramírez Balas, s. f.)

### *C. Punto de inflexión: Crisis energética de la década 1970-80*

A principios de los años 70 se produce la crisis del petróleo que desembocaría en una crisis energética mundial. Ante esta situación, se pone de manifiesto el gran gasto de energía en la edificación, por lo que empieza a surgir *“un nuevo paradigma de arquitectura a partir de una renovada confianza en la tecnología y de su transferencia desde la industria naval y aeronáutica”* (Ramírez Balas, s. f.). Los arquitectos del “High Tech” son encabezados por algunos arquitectos británicos como Norman Foster, Richard Rogers y Renzo Piano, que sin ser británico sí que tuvo una relación muy estrecha con esta escuela al ser compañero de Foster y Rogers. En la arquitectura del High Tech prima la industrialización del proceso constructivo, llegándose hacia construcciones más prefabricadas y al desarrollo de envolventes térmicas de comportamientos complejos.

Este punto de inflexión e inicio del cambio de paradigma ha conllevado hasta el día de hoy una gran cantidad de investigaciones, proyectos de arquitectura teóricos y construidos y la formalización de ciertos elementos en patentes. Estos elementos, desde la década de los 70 hasta la actualidad, se clasifican en tres grupos diferentes para poder abordar así el estado del arte de forma más ordenada en cada uno de los siguientes campos: las patentes, los edificios y proyectos de arquitectura y las publicaciones científicas como artículos, tesis, etc.

#### **I. Patentes**

Dentro del campo de las patentes destacan dos patentes americanas, de principios de la década de los 80, en las que se observan ciertas ideas respecto a carpinterías o vidrios activos con algún tipo de fluido, ayudando al acondicionamiento interior.

En 1982, Robert Seemann patenta “All season window”. Se trata de una ventana conformada por 3 paneles de vidrio o de un material transparente (números 16, 18 y 20 en la Figura 14), cogidas con un marco que sea material absorbente de la radiación solar. Las 2 cámaras contenidas entre los 3 paneles de vidrio y el marco (números 36 y 38 en la Figura 14), son cámaras estancas por las que se circulan agua en una o en otra, dependiendo del comportamiento que se desee de la ventana; teniendo el panel central (número 18 en Figura 14) que tener buena capacidad de absorción de carga solar térmica. En estaciones calurosas, el líquido circula por la cámara exterior (número 38 en la Figura 14), con la idea de que absorba gran cantidad de cargas térmicas solares mitigando la entrada de cargas en el interior. En invierno el caso es diferente, ya que se evita las pérdidas de cargas térmicas desde el interior al exterior, por lo que el fluido circulará por la cámara interior de la ventana (número 36 en la Figura 14).

El objetivo de la patente es proporcionar una ventana que funcione de forma activa durante todos los meses del año, con los cambios estacionales y de clima, como un sistema de control ambiental. La genialidad del invento es que manteniendo su apariencia y sin necesidad de control humano o modificación de la ventana con los cambios estacionales, funciona en situaciones muy diferentes (verano-invierno; ganancias-pérdidas de carga),

sobre todo si el sistema de bombeo del fluido por las cámaras y el intercambio del espacio de circulación se hiciera de forma monitorizada por sistemas de control de condiciones térmicas interiores y exteriores (Seemann 1982).

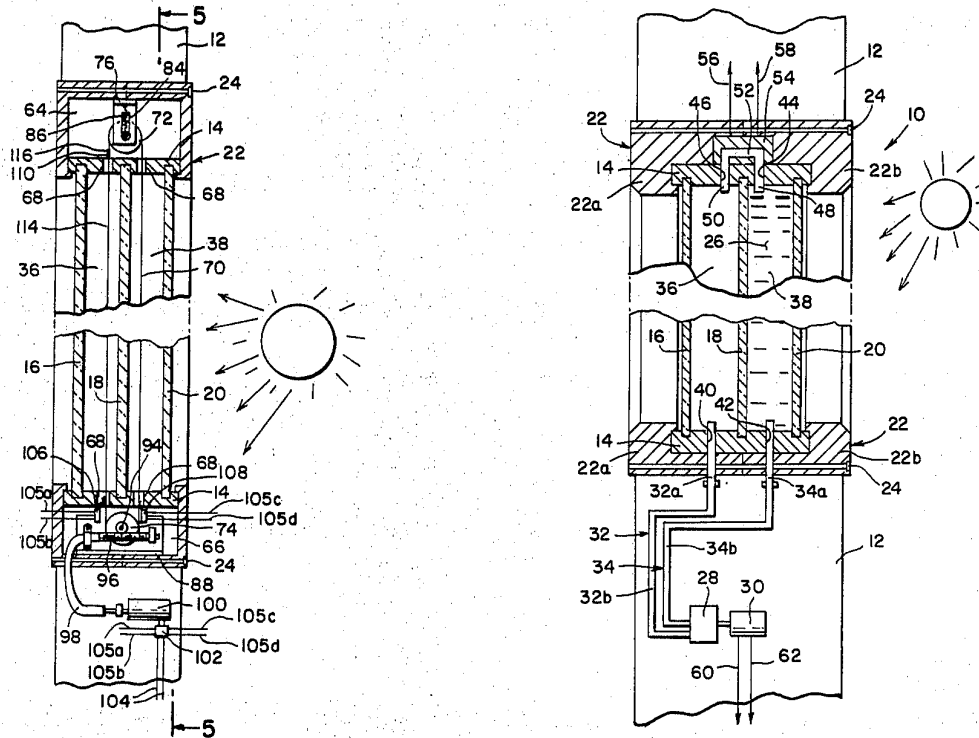


Fig. 14: Esquemas de la patente "All season window" de Seemann, 1982 (Seemann 1982)

Frederick McKee patenta un sistema que llama "Windows" en 1985. Este ingeniero británico, da un paso más allá respecto a lo propuesto por Seemann. La base sigue siendo la introducción de agua en circulación en la cámara existente entre dos paneles de vidrio para reducir las ganancias o pérdidas solares, pero McKee introduce una forma de aprovechar la energía absorbida por el fluido. El sistema de McKee está pensado para aplicarlo sobre edificios con grandes superficies de vidrio, expuestas a la radiación solar y se trata de una ventana que se puede adosar frontalmente a una ya existente (número 2 en la Figura 15), conectada a un circuito primario que intercambia energía con un circuito secundario por planta de la edificación. Este circuito secundario se conectará a los distintos sistemas de instalaciones internos del edificio: climatización, ACS, etc. Cada ventana se alimentará mediante la parte exterior del marco (número 4 en la Figura 15) mediante una conducción de entrada (número 6 en Figura 15), saliendo por la parte superior (número 7 en la Figura 15). (McKee 1985).

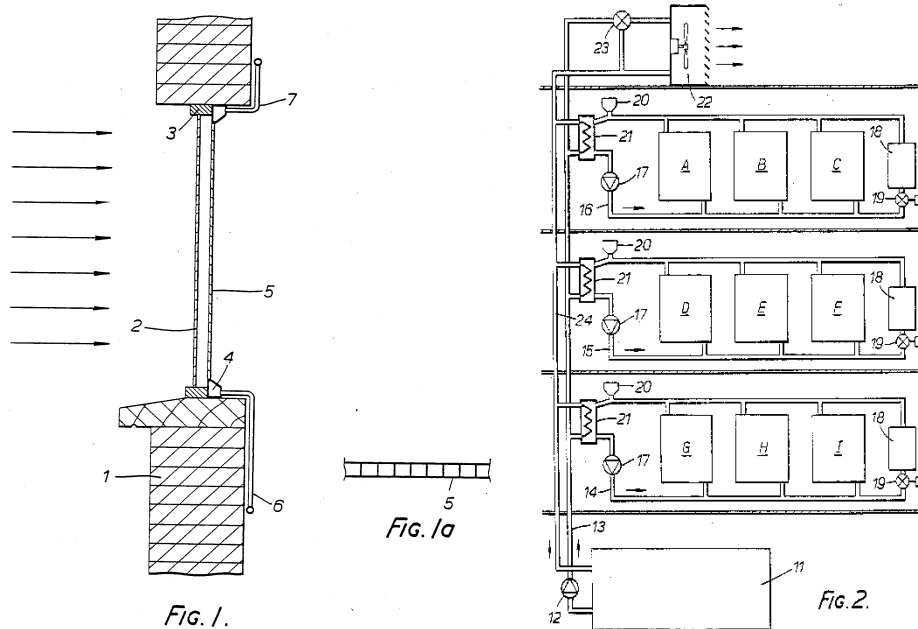


Fig. 15 y Fig. 16: Esquemas de la patente "Windows" de McKee, 1985. Detalle y esquema del circuito secundario. (McKee 1985)

En España, Juan Antonio Hernández Ramos, Miguel Hermanns, Fernando del Ama Gonzalo y César Javier Hernández Jiménez fundan la empresa "Intelliglass", con el claro objetivo de explotar la tecnología de los acristalamientos activos. Estos miembros fundadores, en 2009, patentaron un cerramiento de vidrio con agua circulante llamado "*Cerramientos activos transparentes o translúcidos con capacidad de gestión de energía*" (Hernández Ramos et al. 2009). Esta patente, aporta como novedad el empleo de un sistema destinado a reducir la presión hidrostática a la que se ven sometidos los paneles de vidrio que componen el cerramiento (número 1 en Figura 17). El sistema varía de forma controlada la altura del líquido (número 10 en la Figura 17) mediante aire a presión introducido por un orificio (número 15 en la Figura 17).

Intelliglass comercializa diferentes sistemas de acristalamiento con cámara de agua circulante. Entre las distintas opciones están las que vienen dos paneles de vidrio, tres paneles de vidrio, variantes con células fotovoltaicas o variantes con aislante adosado en la cara interior para utilizarlos como sistema de captación para ACS (Intelliglass 2016).

Esta misma empresa ha construido prototipos en Guadalajara para comparar el comportamiento térmico en dos cabinas idénticas, pero en una de ellas con su sistema patentado incorporado; y también ha colaborado en el proyecto de un aula de la

Universidad de Castilla La Mancha. Ambos ejemplos se analizan en el siguiente apartado del estado del arte.

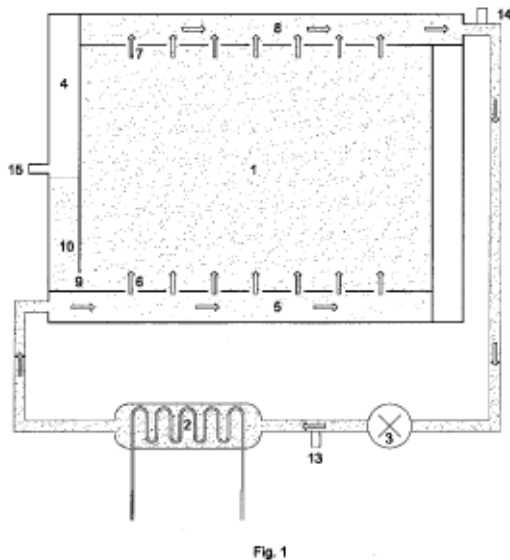


Fig. 17: Esquemas de la patente "Cerramientos activos transparentes o translúcidos con capacidad de gestión de energía", 2009. (Hernández Ramos et al. 2009)

## II. Edificios

El recorrido se centra ahora en analizar las distintas configuraciones y desarrollos del muro neutralizante o de sistemas activos de fachada en edificios de finales del s. XX y principios del s. XXI. Dentro de toda la gama de posibles ejemplos de edificios eficientes con sistemas de control ambiental, se seleccionan dos casos como es el Parque Microelectrónico en Duisburg, de Norman Foster y los edificios y prototipos experimentales con los sistemas desarrollados y patentados de la empresa Intelliglass, compuesta por ingenieros y arquitectos profesionales con gran interés en evaluar la capacidad de fachadas acristaladas con agua circulante en su interior.

Norman Foster concibe la fachada del edificio de oficinas de su proyecto para el Parque Microelectrónico en Duisburg como:

*"una versión avanzada del muro neutralizante, en el que se incorporan soluciones que confiaban parcialmente el control ambiental del edificio a sus fachadas: la regulación de la transmisión de luz y calor, proyección frente a las condensaciones y aislamiento acústico"*<sup>4</sup>

Este proyecto de 1988, proyectado por uno de los mayores valores del High Tech, es considerada una obra Eco-Tech, ya que utiliza la alta tecnología y la implementación de sistemas de gestión y control ambiental para conseguir el acondicionamiento higrotérmico en el interior de las oficinas; dependiendo en muchos aspectos en los elementos que se

<sup>4</sup> Reflexiones de Norman Foster extraídas de (Ramírez Balas, s. f.)



disponen en la fachada, ya que no se tratan de fachadas acristaladas en un edificio de oficinas con un papel meramente pasivo, sino que también se trata de una fachada activa en la climatización.



Fig. 18 y Fig. 19: Interior del Business Promotion Center en el Parque Microelectrónico de Diusburg. Diseñado por Norman Foster, 1988 (Foster and Partners 1988)

La fachada acristalada de doble capa tiene en su interior una cámara de aire, en la que se introducen unas persianas venecianas, de forma que sirvan como sistema de control de la radiación solar.



Fig. 20: Aspecto exterior de la fachada del Business Promotion Center del Parque Microelectrónico de Duisburg. Proyectoado por Norman Foster, 1988 (Foster and Partners 1988)

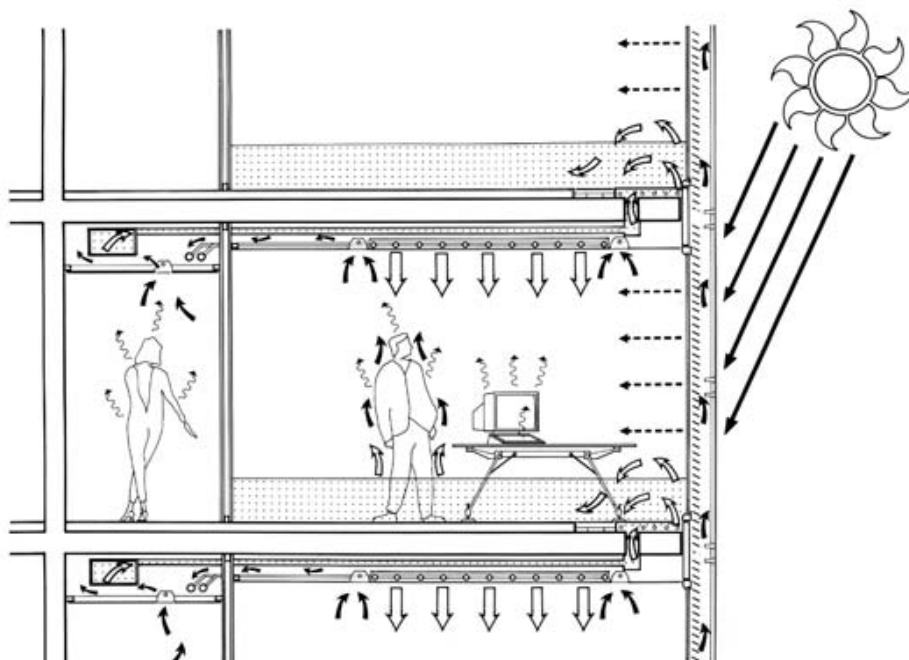


Fig. 21: Esquema de funcionamiento de la fachada como sistema activo en el Business Promotion Center del Parque Microelectrónico de Duisburg. Proyectoado por Norman Foster, 1988 (Foster and Partners 1988)



La cámara entre ambas capas de vidrio funciona como un tiro de aire, trabajando como una fachada ventilada y disminuyéndose, por tanto, el calor transmitido por el sol al interior. La particularidad de esta cámara de aire es que durante el invierno, se suministra aire caliente, desde el sistema de calefacción, en la parte inferior de la cámara, funcionando de forma muy parecida a como había ideado Le Corbusier en el muro neutralizante.

En condiciones de verano, el aire interior de la cámara se calienta ascendiendo rápidamente hacia arriba, y produciéndose una alimentación desde las plantas inferiores, ventilándola y bajando la temperatura en el interior.

Los sistemas de climatización, tanto los encargados de la ventilación como los encargados de la calefacción o la refrigeración, recorren los falsos techo y suelo; y se han seguido estrategias que favorezcan las corrientes convectivas para ayudar a extraer rápidamente el calor disipado por los equipos, personas e iluminación en las oficinas, otra importante carga a tener en cuenta en este tipo de edificios de oficinas. Una de las estrategias posibles en condiciones en las que hace falta disipar más rápidamente el calor, y que proyecta Foster para su edificio, es hacer circular agua a través de las células del falso techo.

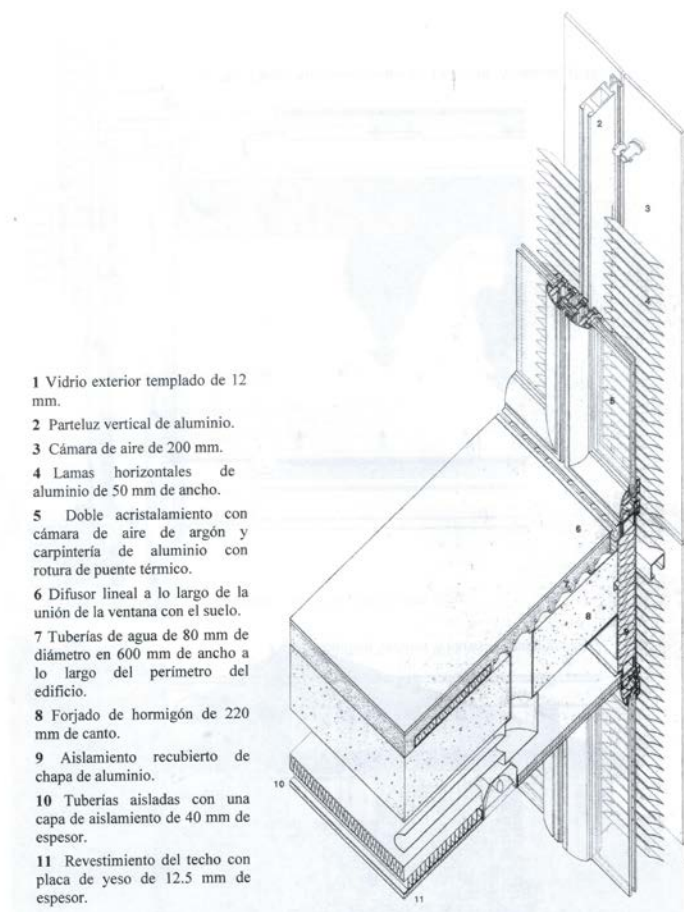


Fig. 22: Detalle de la fachada del Business Promotion Center del Parque Microelectrónico de Duisburg. Proyectado por Norman Foster, 1988 (Ramírez Balas, s. f.)

*“Los edificios con pieles multi-capas son tan eficientes que casi no necesitan calefacción adicional, incluso en los inviernos más fríos. Y sobre los sistemas de refrigeración, más que ocupar los falsos techos y suelos técnicos, han sido miniaturizados. En lugar de usar directamente aire enfriado, hemos descubierto que se puede conseguir una caída dramática de temperatura haciendo circular agua fría por tuberías, como si fueran las aletas de refrigeración de un radiador de un coche. (...) En el futuro incluso podría ser posible imaginar estructuras de hormigón armado donde en lugar de hacer circular agua fría si no hielo picado o granizado a través de ellas. Esto sí que influiría dramáticamente en la reducción de cargas de refrigeración”<sup>5</sup>*

Ya en el siglo XXI, en España, un grupo de profesionales fundaron Intelliglass con la idea de explotar la tecnología de los acristalamientos activos. Después de patentar un sistema en 2009, definido en el sub-punto anterior del estado de la cuestión, construyeron una estación energética experimental en Peralverche (Guadalajara). Dicha estación está conformada por dos cabinas experimentales, en la que la primera está equipada con un acristalamiento doble convencional y la segunda está dotada con el sistema de acristalamiento de agua circulante conectado a un sistema de intercambio de calor por geotermia. Esta investigación, además, estaba apoyada por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), de la cual son profesores algunos de los miembros fundadores de Intelliglass. El profesor de la Escuela Técnico Superior de Arquitectura de Madrid, Luis J. Claros-Marfil junto con otros compañeros, participaron en la construcción y observación de estos prototipos arrojándose unos resultados y conclusiones que se detallarán de forma más concreta en el siguiente sub-punto, al haberse publicado éstos en varios artículos y conferencias (Claros Marfil et al. 2013).



Fig. 23: Fotografía tomada del experimento realizado en 2009 en Guadalajara. (Claros Marfil et al. 2013)

---

<sup>5</sup> Conferencia de Norman Foster en la Universidad de Eindhoven, 26 de Abril de 1996. Extraída de (Slessor 1997)

Un ejemplo arquitectónico a una escala de edificio real de los sistemas patentados por Intelliglass, es el muro cortina activo acristalado con cámara de agua que conforma parte de la fachada del aula polivalente de la Facultad de Periodismo de la Universidad de Castilla La Mancha (UCLM), construido en Cuenca en el año 2010.



Fig. 24: Edificio polivalente de la Facultad de Periodismo de la Universidad de Castilla La Mancha. Proyecto de 2010. (UCLM 2016)

El edificio está concebido como un prisma rectangular y consta de tres plantas sobre rasante y una de sótano. Las dos fachadas longitudinales están orientadas hacia el este y el oeste. El vestíbulo y elemento principal de comunicación vertical acristalado ocupa toda la altura del edificio y está orientado al oeste. Este espacio baña todos los vestíbulos y elementos de distribución con gran cantidad de luz natural, pero también se introduce una alta cantidad de carga térmica debido a la radiación solar, de ahí que se decidiera proyectar este elemento como una fachada activa, para conseguir bajar el pico de radiación que experimenta.

El montaje es similar al del muro cortina convencional, así como el aspecto exterior e interior, pero gracias a las propiedades del fluido que se hace circular por la cámara entre las dos capas de vidrio se absorbe parte del espectro infrarrojo del sol. La circulación de este fluido permite una renovación constante y controlada, manteniendo la estructura completa a una temperatura consignada; de esta manera según la rapidez con la que se

renueve el agua del elemento se consigue un elemento absorbente de energía cuando la renovación es alta o un elemento con gran inercia térmica, con una tasa de renovación baja.

Los montantes y travesaños de la estructura del muro cortina se montan de igual forma que con en los muros cortina tradicionales y se usan para ellos perfiles IPE 300. Sobre ellos se coloca cada pieza de vidrio, siendo éstas de 2m de anchura y 1m de altura, con una composición de una luna de vidrio de 4 mm templado al exterior, una cámara de aire de 10mm., float de 8mm y laminado 6+6mm en el interior. Tras la instalación de los vidrios sobre la perfilería se instala la red hidráulica, constituida por tuberías aisladas térmicamente, conectadas con cada línea de ventanas con su grupo circulador correspondiente, conectándose así todos los paneles de vidrio a la red hidráulica (Intelliglass 2016).

Con esta red de tuberías se consigue hacer circular el fluido por el interior de todos los paneles, dirigiéndose posteriormente a un intercambiador de calor donde se cede o se capta energía en función de las necesidades de la fachada. Además, el sistema está conectado al retorno de un suelo radiante, conectado a su vez a un sistema geotérmico, que permite calentar o enfriar las aulas y despachos.



Fig. 25 y Fig. 26: Detalles de la red hidráulica del sistema activo de fachada (Intelliglass 2016).





Fig. 27: Aspecto interior del sistema activo de fachada (Intelliglass 2016).

En la Figura 28, que se muestra a continuación, se puede ver el esquema de principio de la instalación.

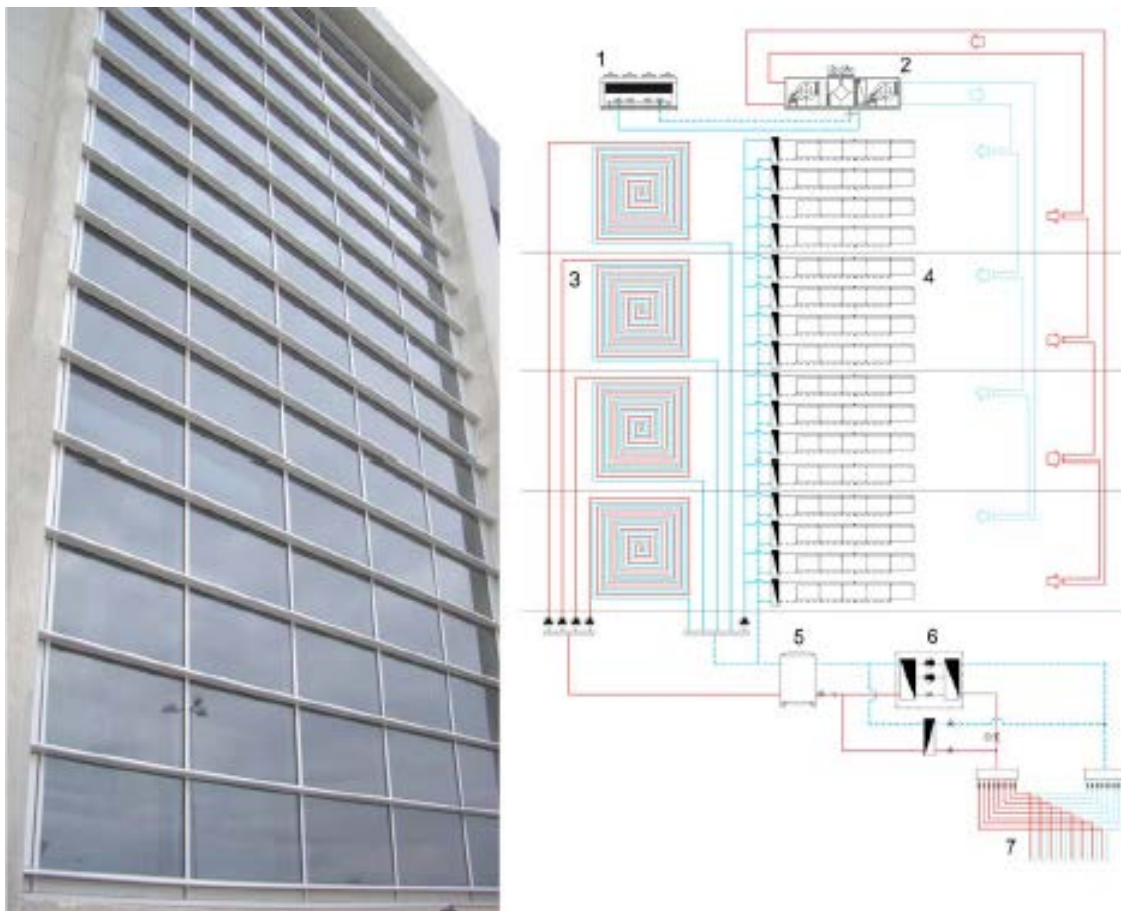


Fig. 28: Esquema de principio de los sistemas involucrados en el sistema de fachada activa. (Díaz, Del Ama Gonzalo, y Hernández Ramos 2014)

Los elementos que conforman el sistema completo, mostrados en la Figura 28, son: 1: Unidad de refrigeración exterior. 2: Unidades de tratamiento y procesamiento del aire (UTA). 3: Suelos radiantes. 4: Paneles del muro cortina activo. 5: Depósito acumulador. 6: Bombas del sistema geotérmico. 7: Sistema de intercambio geotérmico. (Díaz, Del Ama Gonzalo, y Hernández Ramos 2014)

### III. Publicaciones científicas

Para la elaboración del estado del arte desde la literatura científica, se ha hecho un proceso de revisión cronológico de aquellas que se han centrado alrededor del tema de acristalamientos activos con fluido circulante. De ellas se han seleccionado las más relevantes de los últimos 5 años, así como alguna de la última década al considerarse una referencia de las siguientes. La visión contemporánea y las principales investigaciones de fachadas activas, más concretamente de acristalamientos activos, se centran alrededor de las investigaciones realizadas por Tin Tai Chow (TT Chow, en adelante) en Hong Kong, China; siendo el principal desarrollador teórico y simulación de ventanas con agua circulante para reducir las cargas de refrigeración y calefacción en edificios con grandes superficies acristaladas.

TT Chow dirige una investigación por la Unidad de Investigación en Energía aplicada a la Edificación y el Medioambiente de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Hong Kong (Department of Civil and Architectural Engineering, City University of Hong Kong) desde el año 2009, sobre ventanas solares y su aplicación en climas con alta demanda de refrigeración (T. tai Chow, Li, y Lin 2009). En el mismo se analiza *“la gestión energética del sistema de acristalamiento activo con fluidos en la cámara”* (Claros Marfil et al. 2013). En el estudio se empieza a pensar en esta *“tecnología emergente como una posibilidad a reducir las cargas de refrigeración en edificios con grandes superficies acristaladas, en climas con altas demandas de refrigeración”* (T. tai Chow, Li, y Lin 2009). En este estudio se realizan comparaciones entre los resultados arrojados por la simulación informática de tres casos diferentes de composición de la ventana: vidrio claro-agua-vidrio claro, vidrio claro-agua-vidrio reflectivo y vidrio claro-agua-vidrio tintado, distinguiendo entre situaciones entre las que el agua fluye por gravedad y otras en las que es impulsada con una mayor presión. Entre las conclusiones destaca las posibilidades de este sistema para climas con alta demanda de refrigeración, con un coste inicial de la instalación presumiblemente bajo o al menos comparable al de una instalación solar térmica (T. tai Chow, Li, y Lin 2009).

Los resultados recogidos en los estudios del año 2009 por TT Chow (T. tai Chow, Li, y Lin 2009), sirvieron de soporte para continuar desarrollando la idea del uso de agua como fluido caloportador. En 2011 publica nuevos resultados, en dos artículos diferentes, con desarrollos teóricos y de simulación sobre las ventanas con agua, incluyendo ahora una forma de aprovechar la energía absorbida por el agua circulante de las ventanas: se dispone un depósito de agua fría que alimenta el acristalamiento activo por gravedad y una vez este agua es precalentada, se reconduce al circuito de ACS. La consideración de usar las ventanas como generadores de agua caliente como si se trataran de colectores solares

térmicos significa un avance respecto a lo que planteaba Chow en 2009 (T. T. Chow, Li, and Lin 2011a) y (T. T. Chow, Li, y Lin 2011b).

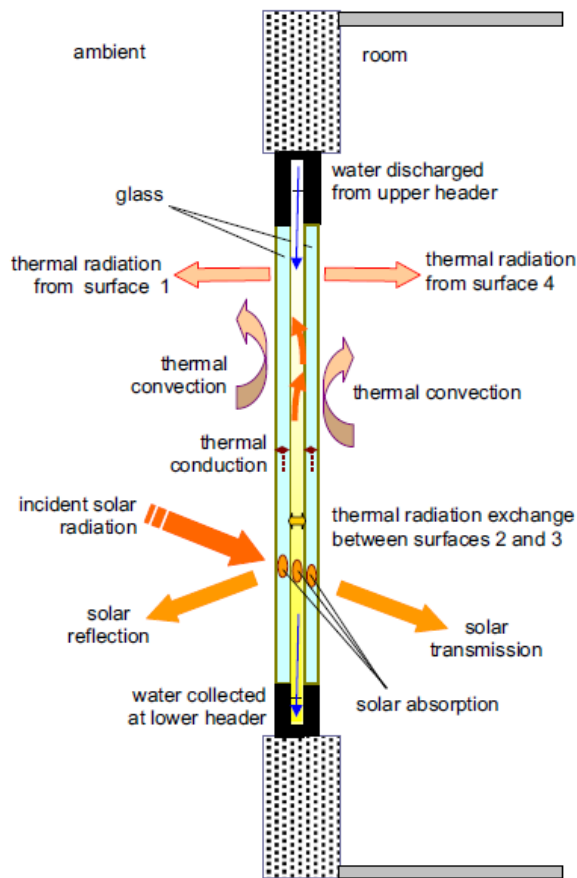


Fig. 29: Esquema de funcionamiento del sistema de acristalamiento de doble capa con cámara de agua circulante. (T. T. Chow, Li, y Lin 2011a)

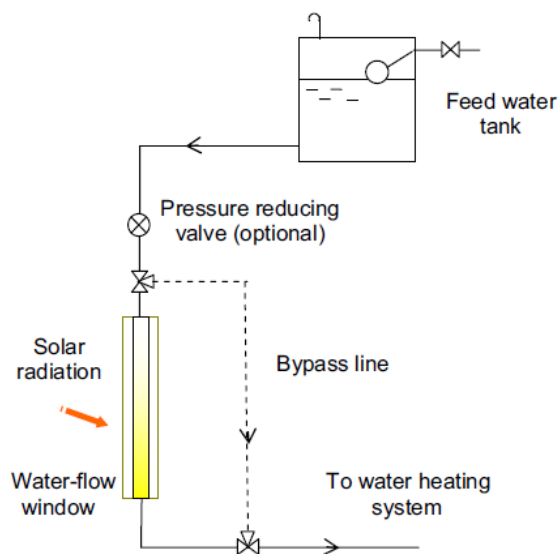


Fig. 30: Esquema de principio del uso de ventanas como colectores solares. (T. T. Chow, Li, y Lin 2011a)

En el año 2012, TT Chow le dirige la tesis doctoral a Li Chunying titulada “Performance Evaluation of Water-flow Window Glazing”, realizada en la Universidad de Hong Kong. En la misma, Chunying realiza una comprobación del rendimiento energético del agua circulante como sistema de almacenamiento de energía solar, con ensayos físicos y simulaciones informáticas. Para ella, se plantean tres supuestos edificios con usos diferentes en cuanto a franjas horarias del uso, cantidad de personas y equipos que emiten calor, tipo de ejercicio que se realiza en el interior, etc. Uno de los elementos claves de la investigación es la introducción de la variable de la calidad lumínica interior, ya que la iluminación natural se ve alterada por el uso de estos sistemas de acristalamientos activos.



Fig. 31 y Fig. 32: Modelos en creados en Hong Kong para el estudio de resultados. Modelos con vidrios verticales e inclinados. (Li 2012)

Los datos arrojados por los modelos, en situaciones de invierno y de verano en la ciudad de Hong Kong, son contrastados con los que arrojaron las simulaciones informáticas realizadas por el propio Li para la elaboración de su tesis. Se concluye, por tanto, que en una semana típica de verano, la ganancia de energía solar interior puede ser reducida en más de un 60% usando dobles acristalamientos en lugar de acristalamientos simples. Además, cuando el doble acristalamiento lleva introducidos en la cámara (de unos 30mm aproximadamente) un fluido circulante, agua, se produce una reducción adicional cercana al 25%. El sistema propuesto tendría un retorno de la inversión inicial rondando los 5 años. Al tratarse de sistemas altamente eficaces para la generación de ACS, se recomienda su uso para grandes edificios acristalados con una alta demanda de ACS, ya que las previsiones de ahorro aumentarían considerablemente (Li 2012).



Claros-Marfil, en 2013, junto con algunos de los miembros fundadores de Intelliglass, realiza estudios sobre unos prototipos con sistemas de control. Los prototipos que se estudiaron son dos módulos, uno equipado con una ventana con cámara de agua circulante y otro con vidrio sencillo. Los sistemas de control mantenían en ambos módulos una temperatura de consigna. En la Figura 33 se observan los comportamientos de ambos, en los que puede observarse cómo durante las horas diurnas, las temperaturas del interior del módulo equipado con la ventana con cámara de agua circulante (línea roja), son menores al módulo con el vidrio sencillo (línea azul). Ambas gráficas siguen un patrón similar respecto a la oscilación térmica exterior (línea verde). La diferencia de energía, absorbida por el agua circulante, se almacena en un tanque de acumulación.

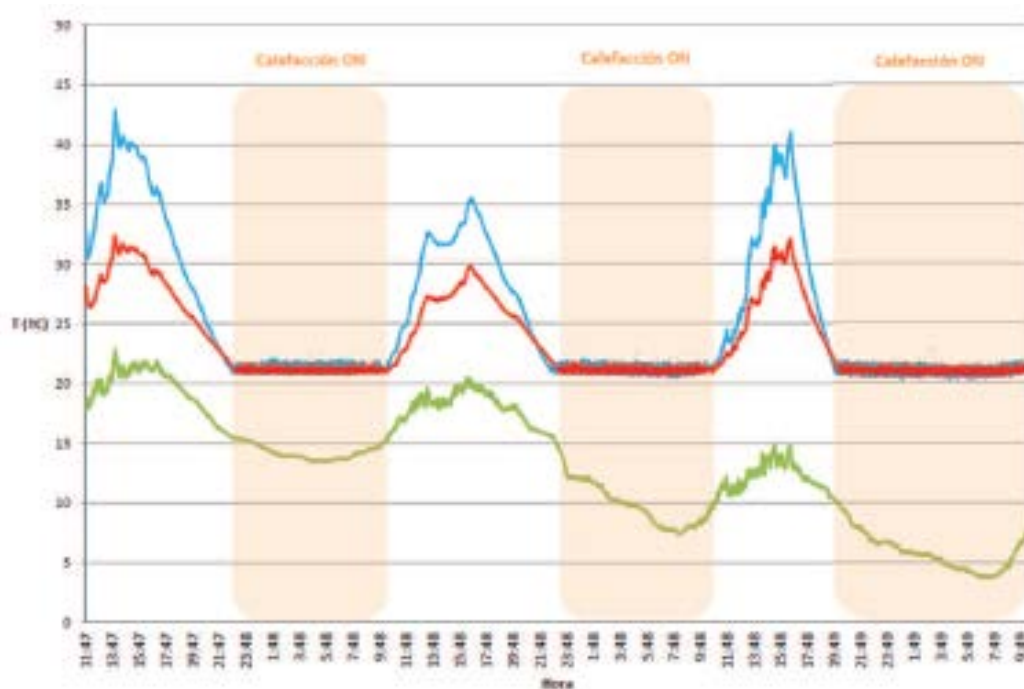


Fig. 33: Gráfica de las temperaturas de los módulos gestionados por el sistema de control. (Claros Marfil et al. 2013)

Las columnas anaranjadas de la gráfica corresponden a las horas nocturnas, donde se activa la calefacción para mantener los módulos a una temperatura de consigna de 21°C. En el módulo que dispone del depósito de acumulación, se aprovecha el calor del mismo, por lo que el consumo de calefacción se ve reducido. Claros-Marfil concluye que *“mediante el uso de este sistema de control, que gestiona el aprovechamiento del acumulador del agua, se han alcanzado ahorros del 28% en consumo destinado a la calefacción de los módulos para condiciones de invierno”* (Claros Marfil et al. 2013)

Tras la construcción del aula polivalente de la Facultad de Periodismo de la UCLM, José M. Díaz, Fernando del Ama y Juan A. Hernández, utilizaron el edificio para tomar mediciones, las cuales se interpretaron y comentaron en una conferencia promovida por la ASHRAE, en 2014 (Díaz, Del Ama Gonzalo, y Hernández Ramos 2014). En ellas se

muestran dos gráficas correspondientes al comportamiento térmico de la fachada en dos días diferentes de Julio de 2013. El caudal de circulación fijado es de  $1\text{l/min m}^2$  en cada ventana, y de  $10\text{l/min}$  en cada fila de las mismas.

El primer día, se trataba de un domingo, por lo que las aulas se encontraban cerradas y el sistema primario de circulación del agua no funcionaba, por lo que la temperatura del agua alcanzó los  $45^\circ\text{C}$  y este calor era transmitido al interior del edificio. Sin embargo, el segundo estudio se realizó un Lunes, en los que los circuitos primarios y secundarios de agua estaban funcionando, por lo que el agua en circulación alcanzó una temperatura pico aproximada de  $35^\circ\text{C}$  y la temperatura interior del edificio no superó los  $27^\circ$  durante todo el día, mientras que cuando el agua no circulaba, se acercó a los  $30^\circ\text{C}$ . Con estos datos, concluyen que las posibilidades de usar este sistema en edificios con radiaciones solares altas, lo ideal sería usar agua fría en la circulación de la misma, de forma que la caída de la temperatura del interior del edificio sea mayor, así como la absorción de energía solar. Sin embargo, hace falta tener sistemas que disipen el calor absorbido por el agua, pudiendo ser diferentes dependiendo de cada proyecto y cada caso. El verdadero potencial sería usar este calor absorbido por el agua para otros usos, en lo que se incrementaría notablemente la eficiencia energética. (Díaz, Del Ama Gonzalo, y Hernández Ramos 2014).

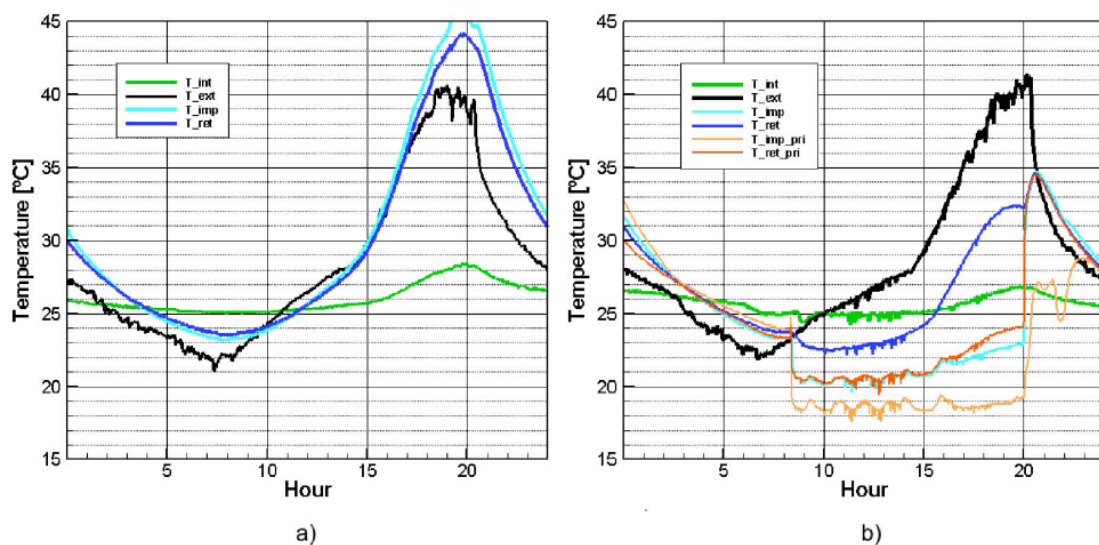


Fig. 34: Gráfica de las temperaturas del estudio de un día en el que la universidad se encontraba cerrada (Caso A) y otro con la universidad abierta (caso B), ambos en condiciones de verano. Línea verde: temperatura interior. Línea negra: temperatura exterior. Líneas azul y cian: temperatura de impulsión y retorno del circuito primario de agua. Líneas naranja y marrón: temperatura de impulsión y retorno del depósito de agua de acumulación. (Díaz, Del Ama Gonzalo, y Hernández Ramos 2014).

### 3. METODOLOGÍA

Con el objetivo de centrar el trabajo hacia la propuesta de fachada activa para un edificio de oficinas en clima mediterráneo, se ha iniciado estudiando las propuestas y resultados a lo largo del s. XX hasta la actualidad, centrándose el estudio en las patentes, los edificios con sistemas ya implementados y la literatura científica.

La metodología a utilizar, siguiendo lo expuesto en el estado del arte, se centrará en rescatar las claves principales de lo estudiando, exponiendo los datos y conclusiones más relevantes de cada ejemplo. Así se pasará a hacer una propuesta teórica valorando los diferentes condicionantes, especialmente aquellos que sean condicionantes para el caso de edificios de oficinas y para el clima mediterráneo, o un clima con altas exigencias de refrigeración debido a las altas cargas térmicas que se absorben mediante la radiación solar en verano.

En clima mediterráneo, el principal aspecto a tener en cuenta en el confort térmico de un edificio es saber controlar las ganancias solares, especialmente altas en verano. Minimizar las ganancias solares y el consumo de energía primaria para sistemas de aire acondicionado y ventilación, deben de ser el principal objetivo a la hora de adaptar una fachada activa a este tipo de clima.

#### *A. Metodología documental.*

Dentro de la metodología documental se clasifican en dos campos las claves que servirán para la propuesta de fachada activa: una recopilación de estrategias pasivas para reducir ganancias solares y conclusiones derivadas de las prestaciones energéticas obtenidas en los distintos estudios, investigaciones, simulaciones y prototipos del estado del arte.

#### **I. Estrategias pasivas para reducir ganancias solares**

Las estrategias pasivas más utilizadas para reducir las ganancias solares en estaciones veraniegas en clima mediterráneo se pueden clasificar en dos campos según su función: sistemas de protección solar y sistemas de ventilación y refrigeración.

Como caso de estudio se ha seleccionado el Edificio Pitágoras en Almería. Se trata de un edificio de oficinas y sede de Tecnova, situado en la zona climática B4 (según CTE-DB-HE-1). Este edificio tiene, desde su proyecto, un gran catálogo de soluciones pasivas para la reducción de las ganancias solares, y esto está reconocido con una serie de certificados: dispone de una calificación energética A, el certificado americano "Leed Platinum" y el certificado europeo "GreenBuilding". El proyecto del edificio pertenece al estudio Ferrer Arquitectos, mientras que el arquitecto específico responsable de la sostenibilidad del mismo es Pedro Seguí.



Fig. 35: Imagen exterior del edificio de oficinas Pitágoras (Plataforma Arquitectura 2013).

La organización formal se basa en una galería principal que se configura como una prolongación del espacio público, como una calle en el interior del edificio, transmitiendo la idea de lo público como lugar de encuentro e intercambio de conocimientos. Esta galería de acceso al edificio y separa los dos cuerpos principales del mismo: el cuerpo de servicio, más estrecho y con orientación noreste que contiene las estancias relacionadas con las instalaciones, archivos y aseos; y el cuerpo de oficinas y laboratorios, con orientación sureste, que a su vez se compone de 4 bloques de oficinas separados por patios ajardinados. Existen, también, dos plantas bajo rasante que contienen las instalaciones principales y el aparcamiento.

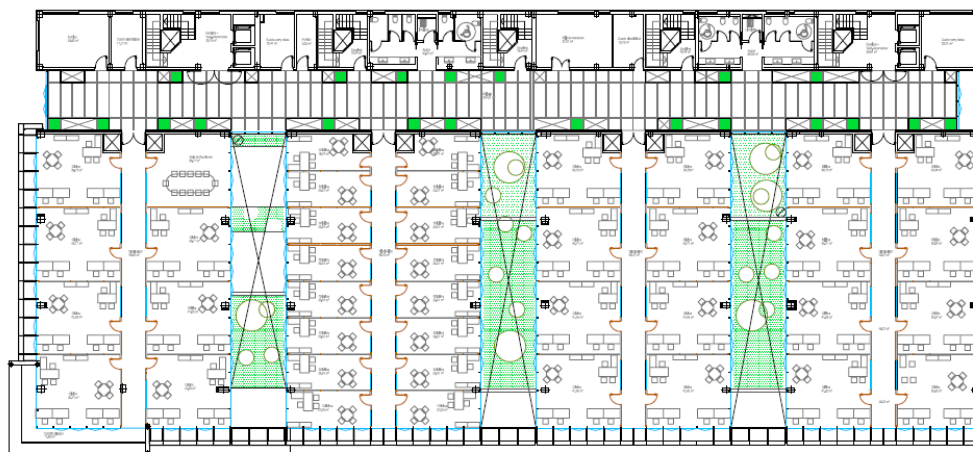


Fig. 36: Planta Tipo del edificio de oficinas (Fuente: Proporcionado por los arquitectos al autor, 2016)

Consta de 110 oficinas de entre 20 y 40 m<sup>2</sup>. Además existen 11 laboratorios y zonas comunes de reunión y descanso, así como una zona de coworking, cualquier usuario dispone de un puesto de trabajo equipado durante las horas que lo necesite. El descanso además puede ex-tenderse a una terraza visitable que aprovecha la situación elevada en loma del edificio, como balcón a la bahía de Almería y el Cabo de Gata.

Algunos de los aspectos de estrategias pasivas más importantes se pueden observar en el esquema de funcionamiento de la Figura 37, y se detallan a continuación, para que sirvan de referencia esquemática los elementos que pueden llegar a ayudarnos en nuestro objetivo.

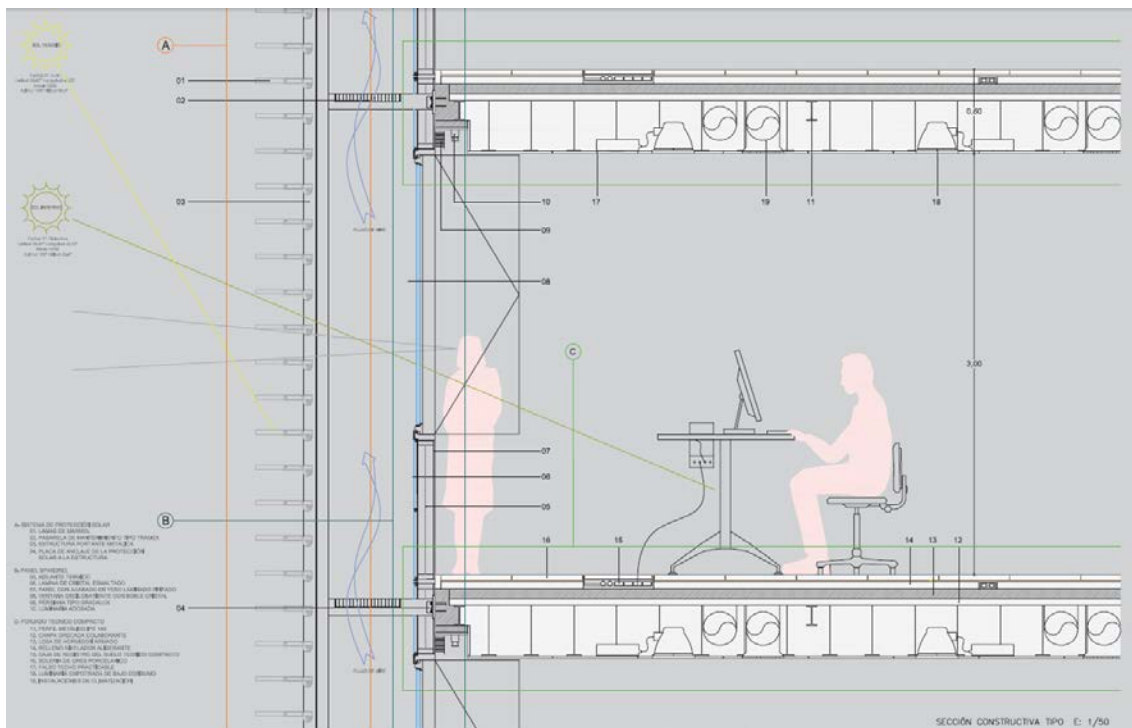


Fig. 37: Esquema del funcionamiento térmico del edificio (Fuente: Proporcionado por los arquitectos al autor, 2016).

- Sistemas de protección solar

#### *Acabados claros*

Se buscan acabados claros en el edificio, usando materiales de alta reflectancia como paneles de aluminio mate, vidrios esmaltados o con capacidad reflectante, etc.

#### *Fachadas ventiladas*

El uso de la fachada ventilada, dejando una cámara por la que pase el aire de forma natural o casi forzada, creando corrientes de aire a modo de “tiro”, ayudan a bajar considerablemente la temperatura de la fachada gracias a las corrientes convectivas,



especialmente la cara interior de la misma, de forma que la transmisión de energía solar por radiación disminuye.

#### *Tratamiento de huecos con protecciones solares*

El uso de celosía o soluciones parecidas para maximizar la superficie de sombra de una fachada es harto conocido. Se suelen usar láminas de diferentes materiales, diseñadas de forma que impidan la radiación directa, pero no disminuya la iluminación natural o la captación solar directa invernal. Es el elemento más usado ante fachadas de gran superficie acristalada, el caso sobre el que nos centraremos: edificios de terciarios acristalados en clima mediterráneo.



Fig. 38-39-40: Ejemplos de usos de acabados claros, fachadas ventiladas y protecciones solares en el Edificio Pitágoras (Plataforma Arquitectura 2013).

- Sistemas de ventilación y refrigeración

#### *Ventilación natural pura*

El uso de ventanas practicables al exterior o patios permiten la ventilación y refrigeración natural. Sin embargo, cuando un edificio es terciario, se pretende que estos elementos no estén controlados por la sensación térmica de los usuarios, si no controlados por sensores térmicos y que sean abiertos o cerrados dependiendo de unas condiciones térmicas dadas en control. El uso de ventanas practicables como tal se obvia ya que la normativa española exige el tratamiento del aire exterior para la ventilación, siendo necesario su filtrado.

#### *Sistemas de ventilación inducida*

Los principios físicos que la apoyan son muy parecidos a los de la fachada ventilada: se intenta crear una circulación de aire vertical, de forma ascendente habitualmente, de forma que el espacio en el que se provoca se refrigera y se ventila, funcionando de forma similar a un “tiro”. Este sistema es normal usarlo con el siguiente tipo de refrigeración.

### *Sistemas de refrigeración y ventilación por enfriamiento latente.*

Se utilizan patios ingleses, vegetación circundante, o el uso de patios interiores que normalmente tienen sistemas de ventilación inducida. En ellos se coloca vegetación de forma que el aire que recorre los diferentes espacios tiene una mayor capacidad de refrigerar los espacios que se encuentran en contacto con la zona ventilada.

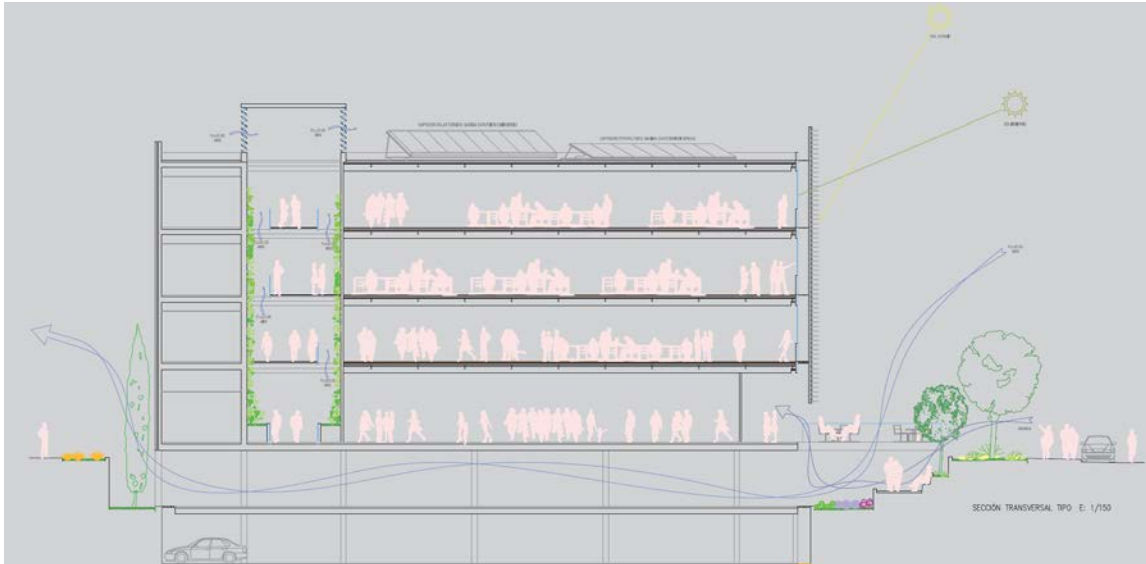


Fig. 41: Esquema del funcionamiento térmico del edificio: ventilaciones (Fuente: Proporcionado por los arquitectos al autor, 2016).

## **II. Conclusiones derivadas de patentes y estudios**

La obtención de claves en la literatura científica donde se recogen el estudio en prototipos, las simulaciones informáticas y el estudio sobre edificios construidos, resulta esencial para la elaboración de una propuesta de fachada, asumiendo todo lo estudiado previamente.

- TT Chow: Sistemas de vidrios activos en climas con alta demanda de refrigeración (Hong Kong).

Entre los estudios realizados por Chow destaca, por su conexión con el objetivo del presente trabajo, los realizados para climas con alta demanda de refrigeración. Chow realiza estudios comparativos entre 3 casos diferentes de composiciones de ventana: vidrio claro-agua-vidrio claro, vidrio claro-agua-vidrio reflectivo y vidrio tintado-agua-vidrio claro. También entre los 3 casos, se diferenciarán entre hacer fluir agua por gravedad o con una presión inducida. (T. tai Chow, Li, y Lin 2009)

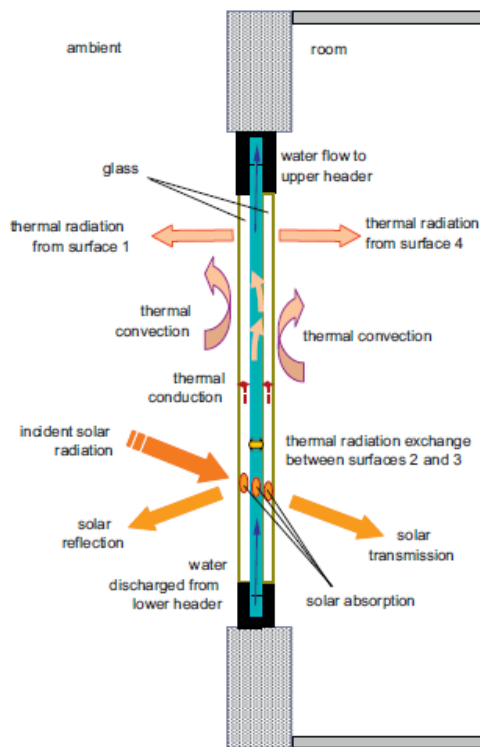


Fig. 42: Mecanismos de transferencia de calor en una ventana con cámara de agua circulante (T. tai Chow, Li, y Lin 2009).

Entre las distintas opciones estudiadas, las dos más atractivas son aquellas que tienen el vidrio reflectivo y el vidrio tintado, haciendo circular el agua con una presión inducida. En el caso del modelo del vidrio reflectivo en la cara interior es con el que se consigue una mayor cantidad de reducción de las ganancias solares interiores ( $186 \text{ W/m}^2$ ) y tiene un valor intermedio de ganancia de calor por el agua ( $171 \text{ W/m}^2$ ); mientras tanto, es el que más penaliza la iluminación natural interior (Coeficiente "VT" es la transmitancia visible: 0,243). En el caso del vidrio tintado en la cara exterior consigue reducir las ganancias solares interiores moderadamente ( $204 \text{ W/m}^2$ ), es el modelo que consigue una mayor optimización de la ganancia de calor por el agua ( $187 \text{ W/m}^2$ ) y la iluminación natural no se ve tan afectada como en el caso del vidrio reflectivo (VT: 0,404).

**Table 4**  
Energy performance at center of glass of water-flow vertical windows with 5.7 mm glass panes and 10 mm channel space, under steady-state summer conditions:  $G=1000 \text{ W/m}^2$ ;  $\theta=60^\circ$ ;  $T_{wi}=T_a=33^\circ\text{C}$ ;  $T_r=25^\circ\text{C}$ ;  $h_o=22.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $h_i=8.29 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Case no.	Glass type	VT	Water temp rise (°C)	Glass temp (°C)		Heat pick up by water stream (W/m <sup>2</sup> )	Water collector efficiency (%)	Room heat gain (W/m <sup>2</sup> )	Remark
				Outer	Inner				
Forced flow system; flow velocity in channel=0.005 m/s									
W1	Clear+Water flow+Clear	0.674	0.66	33.8	33.3	139	23.3	314	Reflective coating at surface 3
W2	Clear+Water flow+Reflective on Clear	0.243	1.09	34.0	33.9	228	38.2	171	
W3	Tinted+Water flow+Clear	0.404	1.29	35.1	33.4	271	45.4	196	
Natural flow system; flow velocity in channel=0.001 m/s									
W4	Clear+Water flow+Clear	0.674	2.46	35.2	33.9	103	17.3	319	Reflective coating at surface 3
W5	Clear+Water flow+Reflective on Clear	0.243	4.08	35.9	35.7	171	28.7	186	
W6	Tinted+Water flow+Clear	0.404	4.45	38.5	34.4	187	31.3	204	

Tabla 01: Resultados obtenidos para las distintas versiones estudiadas. (T. tai Chow, Li, y Lin 2009).



Las principales conclusiones que se extraen del trabajo de Chow para el uso de sistemas de acristalamiento con agua circulante en climas de alta demanda de refrigeración, desarrollados también en sus estudios de 2011, son que el uso de agua circulante reduce la ganancia térmica de la estancia en un 32% con respecto a ventanas equipadas con acristalamientos dobles y un 52% respecto a acristalamientos sencillos, disminuyendo por lo tanto el consumo de energía para refrigeración y que el sistema de vidrio activo también puede ser usado como componente de precalentamiento del sistema de ACS, funcionando a modo de colectores y aprovechando hasta un 20% de la energía solar incidente en un año típico. (T. T. Chow, Li, y Lin 2011)

Estas primeras ideas lanzadas por Chow de las potencialidades del sistema, las estudió y desarrolló con más detalle posteriormente. En uno de los estudios donde se arrojan más datos es la tesis doctoral de Chunying Li, dirigida por el propio Chow, de la cual se extraen algunas claves a continuación.

- Chunying Li: Evaluación del rendimiento de acristalamientos con vidrios dinámicos.

Resulta interesante del estudio de Li la distinción que hace entre distintos tipos de usos: oficinas, cantina y gimnasio. A cada una de ellas le da unas características, mostradas a continuación, entre las que se intenta centrar la atención en el caso del uso de oficinas.

Room Type	Room area (m <sup>2</sup> )	Occupant Density (m <sup>2</sup> /person)	Fresh air (l/s/person)	Lighting Power density (W/m <sup>2</sup> )	Equipment power density (W/m <sup>2</sup> )	Occupants' sensible heat emission (W/person)	Occupants' Latent heat emission (W/person)
Office	100	8	8	17	25	80	60
Canteen	100	1.5	15	23	10	85	75
Gym	200	3	13	17	--	105	160

Tabla 02: Datos previos para caracterizar cada uno de los usos estudiadas (Li 2012).

Aparte de distinguir entre distintos usos, se hace la distinción entre ventanas inclinadas y totalmente verticales. Esta distinción no se tomará en cuenta a la hora de extraer las principales conclusiones del estudio de cara a proponer un sistema de fachada activa. Pero sí es interesante observar cómo Li realiza una triple comprobación en cada uno de los casos: acristalamientos simples, acristalamientos dobles con cámara de aire y acristalamientos dobles con cámara de agua circulante.

Las ganancias de calor mensuales por el agua en el sistema vertical están entre los 215,1 hasta 221,0 kWh/m<sup>2</sup>, siendo en el caso de las oficinas en el que se consigue una mayor ganancia de calor por parte del sistema del agua. Una de las posibles explicaciones es que los sistemas de aire acondicionado están operativos en diferentes franjas horarias

para cada simulación, las oficinas tienen un periodo entre las 6:00 hasta las 22:00h en los días entre semana y de 6:00 hasta las 13:00h para sábados, suponiéndose cerrada los domingos. Sin embargo tanto el gimnasio como la cantina tiene unos horarios más prolongados, esto hace que el sistema de aire acondicionado no influya tanto en la pérdida de calor desde el agua hacia el interior del recinto. Este mismo motivo hace que las ganancias de carga por parte del agua se produzcan en los meses de invierno (29 kWh/m<sup>2</sup> en diciembre por los 14,9 kWh/m<sup>2</sup> en septiembre); debido a que se ven influenciados por los sistemas de aire acondicionado en verano o de calefacción en invierno, según el punto de vista que se tome. Los valores de eficiencia del sistema están asociados a la ganancia de calor por parte del sistema de agua, por lo que los mayores valores muestran una mayor cantidad de energía absorbida por el agua respecto a la que incide sobre el vidrio. Estos valores rondan entre el 17-20% en el caso de la oficina (Li 2012).

	Incident solar energy (kWh/m <sup>2</sup> )	Water heat gain (kWh/m <sup>2</sup> )			System efficiency (%)		
Month	Vertical window	Gym--vertical window	Office--vertical window	Canteen--vertical window	Gym--inclined window	Office--inclined window	Canteen--inclined window
Jan	111.5	22.7	23.5	23.4	20.4	21.1	20.9
Feb	84.3	15.5	16.0	14.9	18.4	19.0	17.7
Mar	76.5	13.5	14.3	13.9	17.6	18.6	18.2
Apr	72.4	13.0	13.4	13.2	17.9	18.4	18.2
May	73.7	14.0	14.4	14.3	18.9	19.6	19.4
Jun	73.9	12.7	12.8	12.5	17.1	17.4	16.9
Jul	94.4	15.9	16.4	16.2	16.8	17.4	17.1
Aug	95.8	16.6	16.9	16.7	17.3	17.6	17.5
Sep	95.0	14.6	14.9	14.9	15.4	15.7	15.7
Oct	136.8	24.4	25.3	23.4	17.8	18.5	17.1
Nov	127.2	23.9	24.0	24.1	18.8	18.9	18.9
Dec	140.8	28.3	29.0	28.2	20.1	20.6	20.1
Sum	1182.4	215.1	221.0	215.7	18.2	18.7	18.2

Tabla 03: Datos mensuales en el caso del sistema vertical (Li 2012).

Las ganancias de calor mensuales en el interior de las oficinas, distinguiendo entre los tres casos de acristalamiento, son los mostrados a continuación. Se puede observar cómo las reducciones entre usar el acristalamiento simple o el doble con cámara de agua circulante, son alrededor del 70% en los meses de verano (Julio) e invierno (Enero). A nivel general, el cambio entre el acristalamiento simple, a uno doble supone una reducción del 60% (18291 kWh) y el cambio una reducción adicional de más del 30% (2550 kWh).

Month	Single layer of absorptive glazing-with daylighting	Double absorptive glazing with air gap-with daylighting	Water-flow glazing with double layers of absorptive glazing-with daylighting
Jan	2360.2	900.3	706.2
Feb	2048.5	785.7	616.8
Mar	1973.9	761.2	599.6
Apr	2112.6	820.4	646.8
May	2381.5	932.3	726.2
Jun	2407.3	941.1	732.6
Jul	3440.9	1351.0	1032.7
Aug	2764.3	1078.2	834.4
Sep	2531.2	981.6	763.3
Oct	2739.8	1048.9	812.5
Nov	2558.5	972.6	757.7
Dec	2491.1	946.4	740.2
Sum	29810.0	11519.7	8968.9

Tabla 04: Datos mensuales de ganancias térmicas interiores en el caso de oficinas, dependiendo del sistema usado (Li 2012).

Esto se conecta, también, a las cargas de refrigeración que harían falta para acondicionar cada uno de los espacios en los distintos meses del año. Para el caso de la oficina, las cargas del sistema del aire acondicionado se reducen en un 1,5% cuando se usa el sistema de doble acristalamiento frente al de simple acristalamiento (454kWh/año). Mientras tanto, se consigue una reducción adicional del 7,8% de las cargas del aire acondicionado si este sistema de acristalamiento doble fuera con cámara de agua circulante (2345kWh/año)

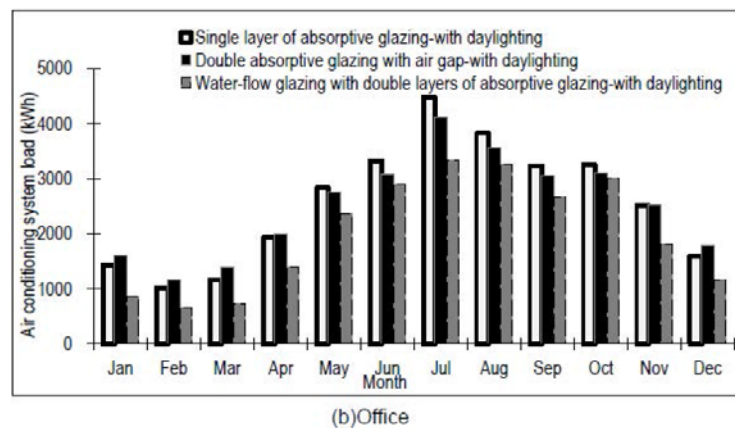


Figura 43: Datos mensuales de cargas del sistema de refrigeración en el caso de oficinas, dependiendo del tipo de ventana usado (Li 2012).

El uso del sistema de doble acristalamiento con cámara de agua circulante conlleva el cambio de la hora en las cargas pico, trasladándose de horas más cercanas al mediodía hacia la tarde. Esto se debe a que el agua de las ventanas se comporta como un

acumulador solar, y aunque se le adjunten sistemas de disipación de energía, la inercia térmica del agua hace que ésta siga emitiendo calor por la tarde hacia el interior, cuando el sol empieza a caer. (Li 2012)

Li estima un retorno económico de 5 años del sistema, gracias al ahorro económico que supone la disminución del consumo de energía de refrigeración así como la energía devuelta al sistema de ACS por el efecto acumulador del agua circulante en las ventanas. Si el sistema no aprovecha el calor absorbido por el agua, simplemente lo disipa, su eficiencia bajaría, aumentando su retorno. Esto conlleva que para aumentar la eficiencia de todo el sistema, el diseño del intercambiador de energía es muy importante. (Li 2012)

Como para el cálculo de la eficiencia del sistema se tiene en cuenta el supuesto aprovechamiento de la energía absorbida por el agua, los sistemas de acristalamientos activos son más eficaces cuanto mayor es la radiación solar. Por ello es recomendable el uso de estos sistemas en edificios con altas demandas de ACS (Li 2012).

- Sistema de Intelliglass instalado en el aula polivalente de la Facultad de Periodismo de la UCLM.

El comportamiento del sistema instalado en verano está concebido para evitar un efecto invernadero en el interior del edificio debido a la gran superficie acristalada. El sistema funciona por tanto como un sistema de protección solar, ya que la energía que absorbe el agua circulante por las tuberías se disipa a través de un sistema geotérmico. Según las simulaciones, previas a la construcción del mismo, la reducción en verano es de 29MWh. (Díaz, Del Ama Gonzalo, y Hernández Ramos 2014). Una porción de vidrio de 10m<sup>2</sup> en una hora pico reduce la transmisión de carga térmica desde 6000W a poco más de 1000W, suponiendo una disminución total en verano del 80% del consumo energético para refrigeración del espacio (Díaz, Del Ama Gonzalo, y Hernández Ramos 2014).

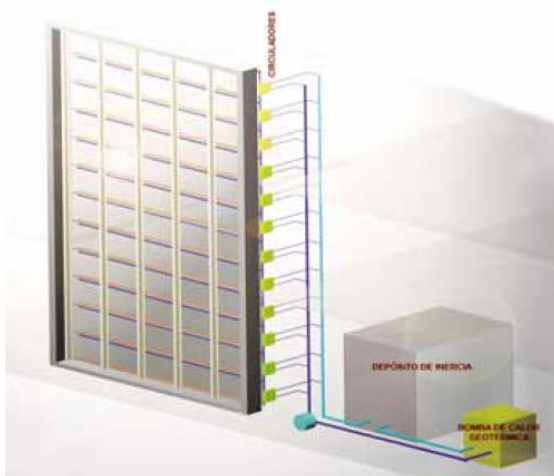


Figura 44: Esquema de principio de la instalación (Intelliglass 2016).

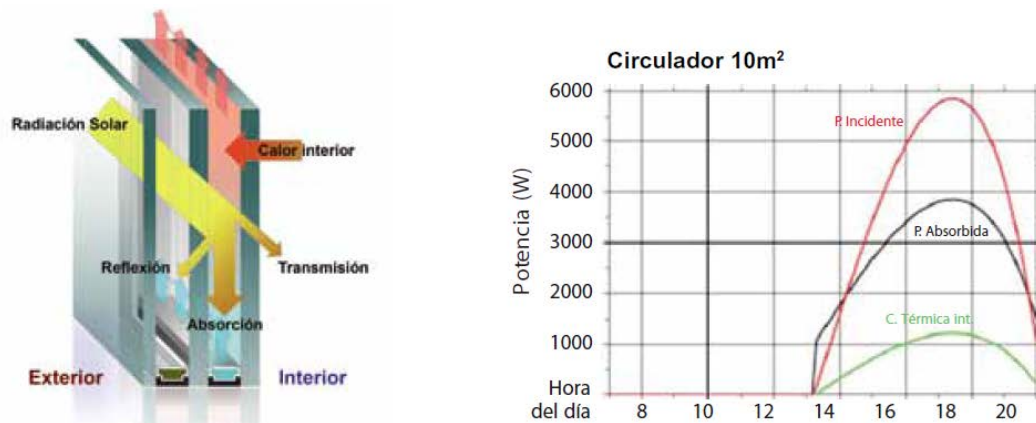


Figura 45-46: Esquema de principio de la instalación en verano y gráfica de resultados (Intelliglass 2016).

### *B. Condiciones para las propuestas de fachadas.*

Las condiciones sobre las que se trabajarán para la propuesta de fachada, son las siguientes. Estas condiciones serían las que deberían de introducirse en los distintos programas de simulación informática para sacar resultados o intentar relativizarlas y concretarlas en módulos o prototipos sobre los que hacer un estudio de campo.

El clima considerado como mediterráneo, según el CTE-DB-HE, son los asociados a las letras A y B, que significan unos inviernos más suaves y a los números 3 y 4, con veranos más calurosos, resultando las opciones A4-A3-B4-B3. (CTE 2013)

Las horquillas de las condiciones interiores de diseño interior, vienen definidas por el CTE-DE-HE-2, el cual remite al Real Decreto 1027/2007, conocido comúnmente como "RITE" (Reglamento de Instalaciones Térmicas en la Edificación). Las condiciones elegidas de verano son de 25°C y 55% de humedad relativa y las de invierno 21°C y 45% de humedad relativa.

En la definición del horario, el cual servirá para definir el horario de consigna de todas las cargas del edificio, se concretiza como un horario de oficina típico. Los días entre semana tendrán un horario de 9:00 a 15:00h, teniendo dos días servicio de tarde de 17:00 a 20:00. Los sábados, domingo y el mes de agosto las oficinas permanecerán cerradas. Las cargas internas definidas son de 13,50W/m² de carga sensible y 10W/m² de carga latente asociadas a una ocupación trabajando de forma ligera y sentada (MET=1,08). La iluminación de un espacio de trabajo como unas oficinas se estima de 10W/m² y los equipos unos 50W/m² ya que unas oficinas se caracterizan por disponer de varios tipos de equipos como ordenadores, fotocopiadoras, etc. que emiten calor.

El módulo de despacho pensado es de 10m de ancho y más de 25m de largo, siendo una sala de oficinas diáfana sin divisiones.

Clima	Condiciones interiores de diseño		Horario			Cargas			Módulo de oficina
A4 A3 B4 B3	Verano	Invierno	L-X-V	M-J	S-D- Agosto	Ocupación	Iluminación	Equipos	10m crujía Más 25m largo
	25°C	21°C	9:00-15:00	9:00-15:00	Cerrado	Sensible 13,50 W/m²	10 W/m²	50 W/m²	
	55%	45%		/					
	Humedad relativa	Humedad relativa		17:00-20:00		Latente 10 W/m²			

Tabla 05: Datos para el diseño del sistema de fachada en oficinas (Elaboración propia).

### C. Propuestas de fachadas.

Para realizarse la propuesta de fachada activa, se considera al elemento de doubles acristalamientos con cámara de agua circulante como un sistema de protección solar, trabajando como un elemento de aislamiento, a raíz de lo vertido por los estudios analizados.

Una de las potencialidades del sistema radica en el aprovechamiento de la energía solar acumulada en el agua, al funcionar los acristalamientos como acumuladores solares. Esta energía es sólo aprovechable en invierno para ayudar a climatizar las oficinas, ya que la demanda de ACS es prácticamente inexistente en estos usos; y en verano no existiría demanda de agua caliente. Considerar formas alternativas de utilizar los recorridos de las redes de distribución del agua circulante de los acristalamientos así como las temperaturas a las que circulará en la ida y el retorno, es el punto central sobre el que circundarán las estrategias de acondicionamiento con fachada activa.

Una consideración importante a tener en cuenta es el comportamiento térmico de las fachadas y las zonas del edificio de oficinas en sus distintas orientaciones. Las fachadas que estén dirigidas al sur van a tener grandes aportaciones solares en verano, por lo que prever sistemas de ventilación y dispositivos que generen sombra o protección solar son imprescindibles. En invierno, al seguir teniendo radiación solar directa se pueden trabajar con efectos invernadero, para conseguir una fachada más caliente que el ambiente interior, ayudando a evitar las pérdidas térmicas. Las fachadas dirigidas al norte con sistemas de grandes acristalamientos no sufrirán, sin embargo, un sobrecalentamiento excesivo en verano, pero conllevarán una gran pérdida de cargas en invierno; por lo que se perseguirán estrategias que durante el invierno creen un gran aislamiento entre ambientes interior y exterior.

Durante las estaciones intermedias, en las que en el interior del edificio de oficinas se seguirá generando una gran cantidad de cargas térmicas que son necesarias disipar,



debido a las emitidas por personas, equipos e iluminación, mientras que en el exterior las condiciones son templadas. En España, debido a la normativa vigente, el uso de filtros para impedir introducir aire no tratado al interior imposibilita de facto la ventilación natural directa. Estrategias que aprovechen los procesos conocidos como “free-cooling” serán las que influyan directamente en el diseño del funcionamiento del edificio en estos meses.

Por tanto, las estrategias generales de acondicionamiento estarán asociadas al sistema de fachada activa, intentando alcanzar cotas de mayor eficiencia en los procesos generados. El uso de estrategias generales sobre todo el edificio, o sobre grandes sectores del mismo, permite tener una mayor precisión y eficiencia, siempre y cuando se acompañen por sistemas de control remoto. Para el acondicionamiento más certero y “fino” de cada área de oficinas, se encontrarán los sistemas de climatización clásicos; los cuales van a tener una incidencia menor en el consumo energético total del edificio al aplicarse estrategias generales de fachadas activa para evitar el uso de los mismos.

Las dos estrategias generales que definirán el sistema de cara a cada estación del año, se centrarán en modificar el funcionamiento de la cámara de fachada con su doble capa, así como el funcionamiento de la parte de doble acristalamiento con cámara de agua circulante y sus líneas de distribución.

Se muestra a continuación una propuesta de fachada activa pensando en su funcionamiento en la orientación sur y se detallan los posibles cambios de funcionamiento de la misma en la orientación contraria, la norte.

- Definición constructiva

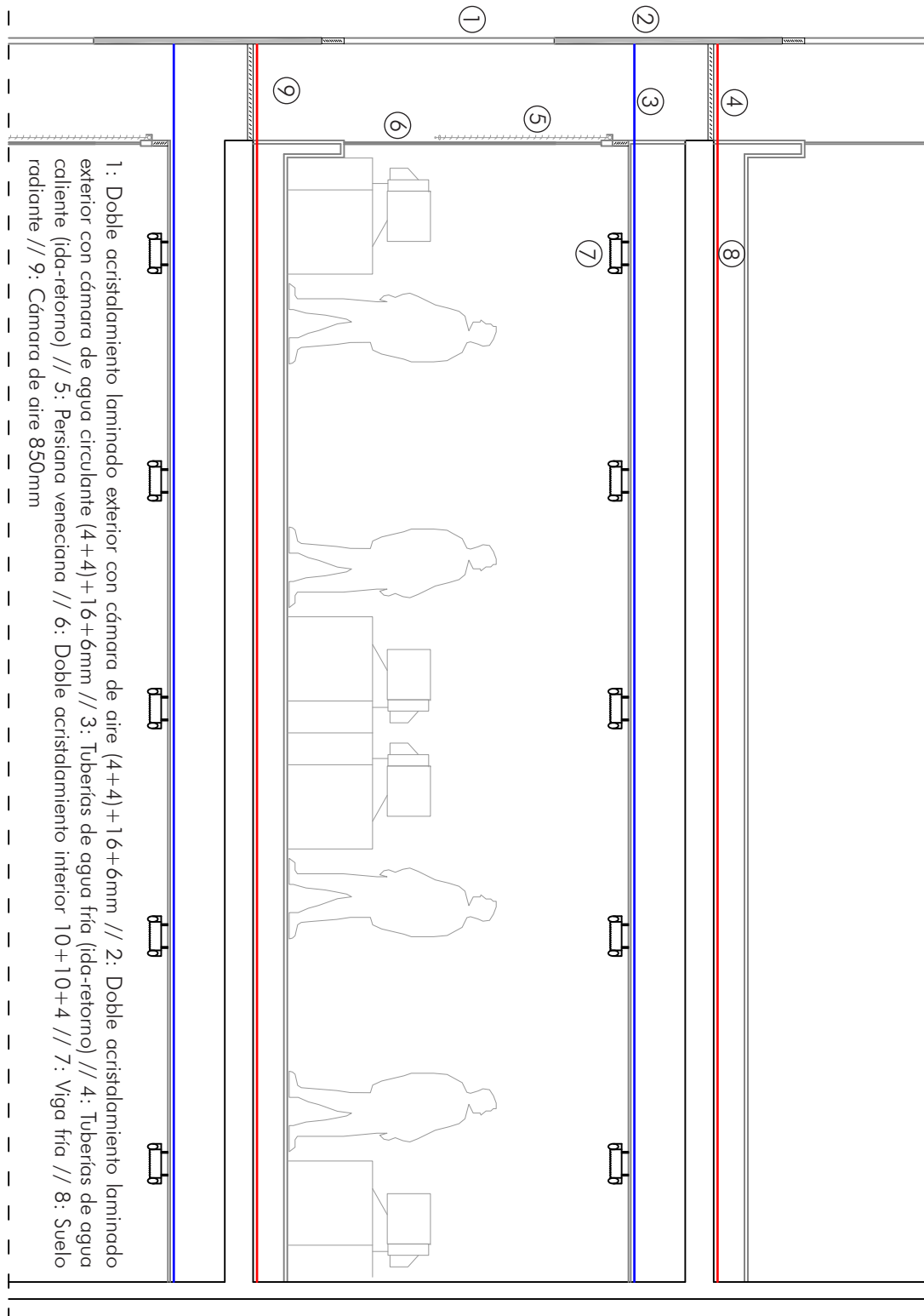


Fig. 47: Definición constructiva. Escala 1:40m (Elaboración propia).

- Funcionamiento del sistema en verano.

En verano, la cámara intermedia de la doble capa de acristalamiento que compone la fachada funcionará como un tiro, ya que se permitirá entrada de aire a cada nivel, y en la parte superior del edificio estará la salida del aire caliente. Esta ventilación de la cámara es primordial para evitar el efecto invernadero de la misma.

Se dimensiona la posición del doble acristalamiento activo para que se encuentre en la parte de la fachada que afecta a la zona donde la luz incidiría directamente en el interior. Este elemento, circulando por él agua fría, servirá como un sistema de protección solar, así como un colector térmico. El acristalamiento activo estará conectado a un trazado de sistema hidráulico de forma que su ramal de ida recorre los falsos techos de las oficinas, serpenteando en unos elementos que funcionarán como vigas frías. Estos elementos integran también las luminarias, de forma que el calor generado por las mismas se disipen igualmente por su propio funcionamiento. Los flujos convectivos de la sala harán que las cargas que emiten las personas y los equipos suban, y que el aire interior se enfríe al pasar a través de las vigas frías, descendiendo el aire a causa de la propia estratificación del aire. Esto ayudará a generar y mantener el confort térmico durante largos períodos. El trazado de retorno se conectará directamente al retorno del suelo radiante en situaciones de verano, dirigiéndose al sistema de disipación de energía que se proyecte para el edificio.

La fachada norte tendrá un funcionamiento similar, con el beneficio que la radiación solar no será directa, por lo que será más fácil conseguir el confort térmico interior.

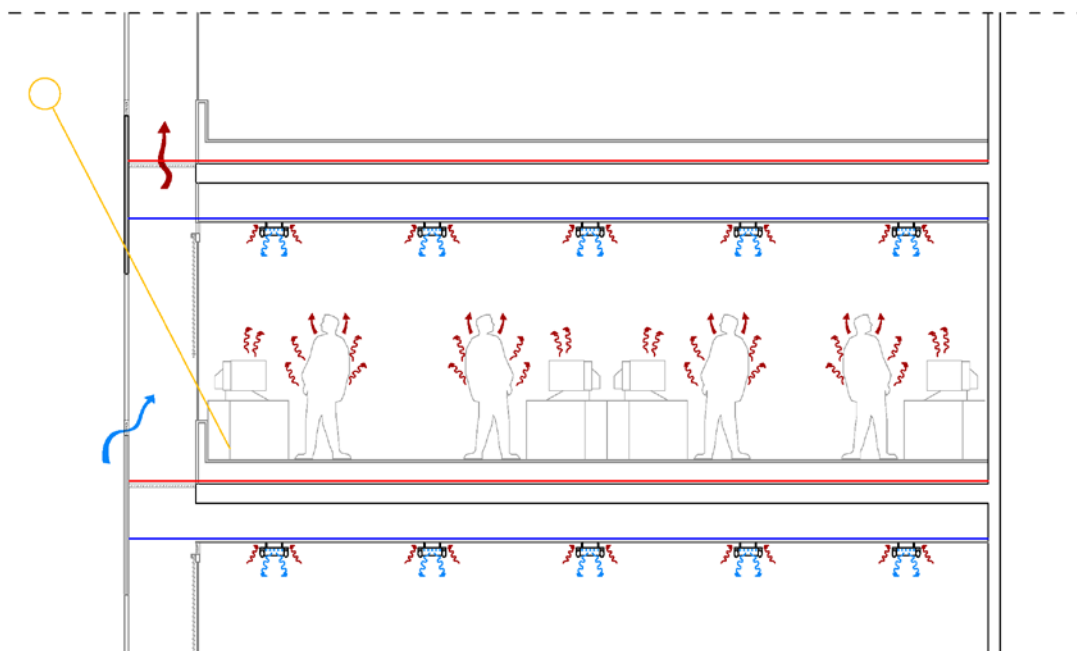


Fig. 48: Esquema del funcionamiento térmico del edificio de oficinas en verano (Elaboración propia).

- Funcionamiento del sistema en invierno.

En condiciones de invierno, la cámara de aire entre las dos capas de vidrio que conforman la fachada será estanca, funcionando a modo de invernadero. Esto se consigue cerrando las rejillas que durante el resto de año se encuentran abiertas para evitar, precisamente, este efecto.

El doble acristalamiento con cámara de agua circulante funcionará como un elemento de aislamiento entre el interior y le exterior, evitando la pérdida de cargas térmicas interiores. La dirección del trazado se invertirá, de forma que la ida la conforme el serpentín de los falsos suelos a modo de suelo radiante, y el retorno se conectará con una línea directa de retorno que no atraviese las vigas frías.

Por la inclinación del sol en invierno, calculado para la situación en la localidad de Sevilla, la radiación solar entrará directa al interior sin pasar por la zona de acristalamiento activo, potenciando así la ganancia térmica solar en las oficinas.

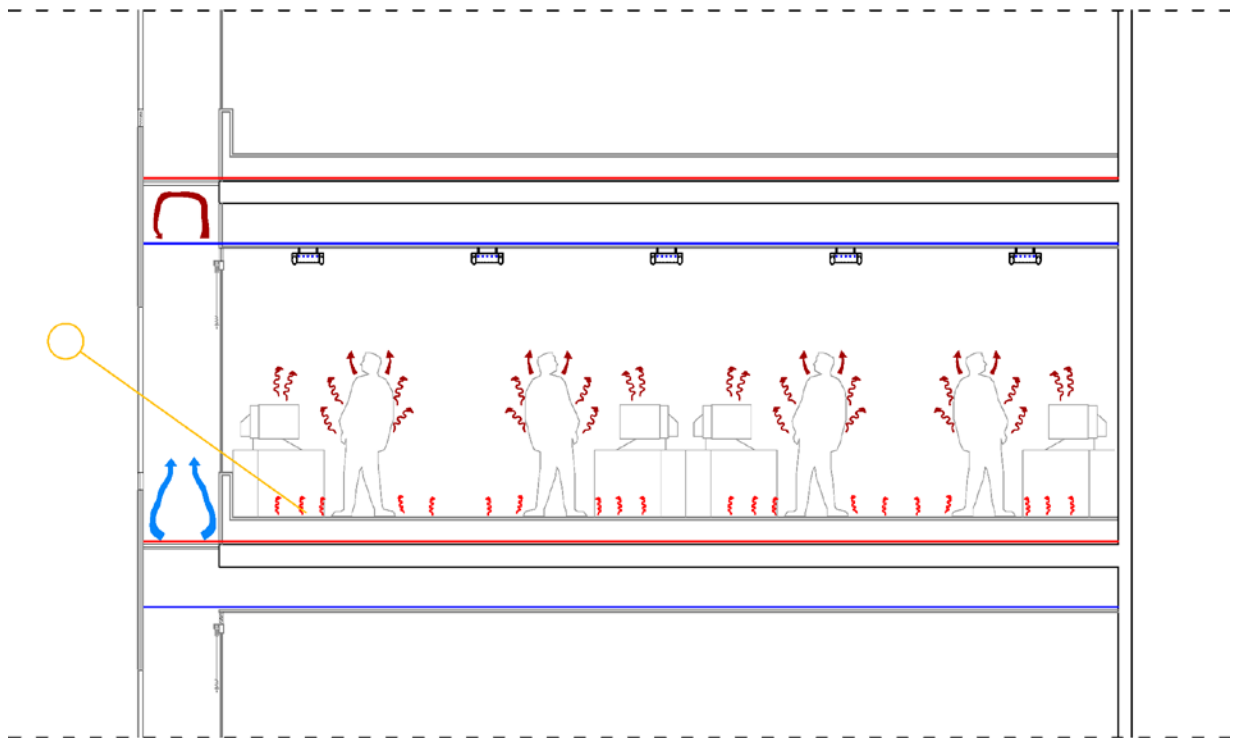


Fig. 49: Esquema del funcionamiento térmico del edificio de oficinas en invierno en orientaciones sur-este-oeste (Elaboración propia).

En invierno, es clave el funcionamiento de la fachada norte, ya que por la misma se producirá una gran pérdida de cargas térmicas. Para evitar esto, la cámara entre ambos acristalamientos no funcionará como un invernadero, debido a que en la orientación norte, no habrá radiación solar directa. Para intentar suplir esto y generar una capa de aislamiento entre el interior y el exterior, se impulsará en esta cámara aire caliente directamente desde los sistemas de climatización interiores.

A esta estrategia de aire caliente en la cámara se sumarán el resto, pensadas para las situaciones de invierno en las otras orientaciones de fachadas, descritas anteriormente.

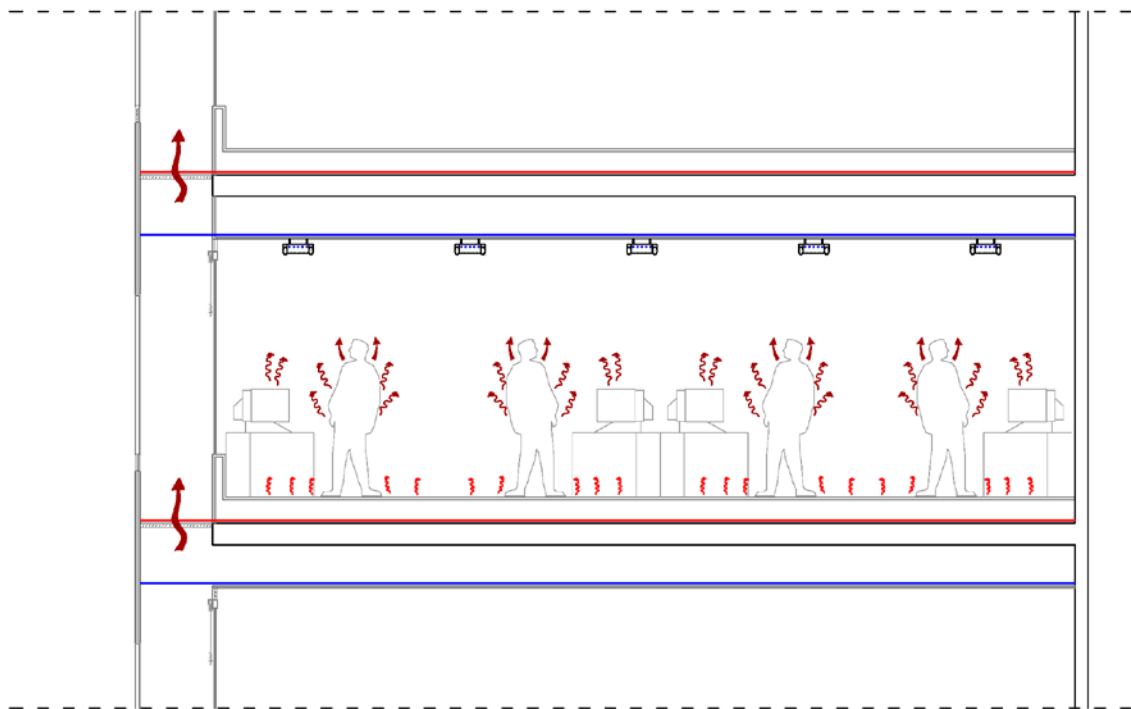


Fig. 50: Esquema del funcionamiento térmico del edificio de oficinas en invierno en orientación norte (Elaboración propia).

- Funcionamiento del sistema en medio-clima.

Debido a la imposibilidad de realizar ventilación natural directa para disipar las cargas térmicas interiores producidas por los equipos y personas por la normativa española con las exigencias de filtrado para garantizar la calidad del aire, las principales estrategias están dirigidas en conseguir el enfriamiento del ambiente interior a través de una ventilación que aproveche la buena temperatura del aire exterior.

La cámara de aire no sólo trabajará como un tiro, si no que ahora estará conectado el interior del edificio. En condiciones de verano o invierno, interesa que el retorno de los sistemas de ventilación, pase por el equipo de tratamiento (UTA o UTAE), para así poder realizar los procesos de recuperación de calor y atemperar el aire que se preparará para ventilar el interior. Sin embargo, en situaciones de medio-clima nos encontramos en muchas ocasiones con situaciones de "free-cooling", de forma que la temperatura del aire exterior es la ideal para introducirla directamente, sin necesidad de atemperarla. Por ello, los procesos de recuperación de calor se anulan y se puede pensar en extraer aire caliente del interior directamente hacia el exterior; siempre y cuando se introduzcan por medio de sistemas con UTA o UTAEs el caudal de aire filtrado a la temperatura idónea necesario.

El sistema de doble acristalamiento con cámara de agua circulante, seguirá en funcionamiento como se hace en situaciones de verano, haciendo funcionar las vigas frías como un modo extra de extraer cargas térmicas del interior.

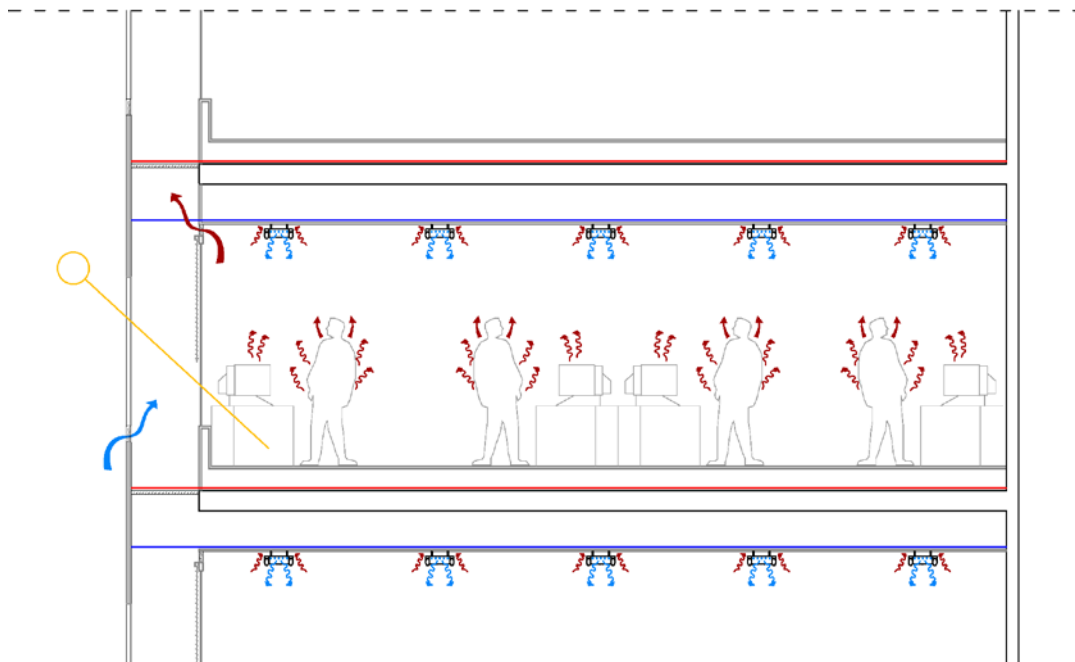


Fig. 51: Esquema del funcionamiento térmico del edificio de oficinas en primavera y otoño en situaciones de free-cooling (Elaboración propia).



## 4. CONCLUSIONES

De manera general se puede concluir que tanto las investigaciones realizadas a nivel internacional, liderados por TT Chow y Chunying, como las realizadas en España, demuestran la validez del uso de sistemas de fachadas activas para reducir la demanda energética. A esto hay que añadir lo interesante que resulta priorizar, desde el punto de vista arquitectónico, el diseño de fachadas activas al de sistemas de instalaciones de acondicionamiento.

Existen muchas soluciones posibles de fachadas activas, pero se ha centrado el estudio en sistemas aplicables para edificios terciarios, más concretamente de oficinas. Estos usos, requieren edificios con grandes superficies acristaladas; por lo que se enfocó el estudio en y la gran cantidad de investigaciones y desarrollos de sistemas de acristalamientos activos. Este sistema tiene una gran potencialidad, sobre todo si se considera el acristalamiento activo como un elemento terminal más de un sistema hidrónico más amplio que recorra todo el edificio.

Al definir las potencialidades de estos sistemas usados en edificios localizados en ciudades con clima mediterráneo, las mayores ventajas del sistema las proporcionarán en estaciones estivales o en momentos con alta radiación solar incidente sobre el edificio. Por ello, se ha definido la utilidad que tienen los acristalamientos activos funcionando como colectores solares, los cuales absorberán una gran cantidad de energía térmica por la radiación solar.

Sim embargo, al ser muy baja la demanda de ACS en edificios de oficina, una de las mayores potencialidades del acristalamiento activo arrojados en las distintas investigaciones realizadas, que es su uso como sistema de precalentamiento para ACS, resulta de poca utilidad. La opción de disipar esta energía siempre está presente, pero pensar en soluciones que la aprovechen ha sido uno de los objetivos del presente trabajo.

Si los acristalamientos activos se tratasen de elementos terminales de un sistema hidrónico, pensar en cada uno de los distintos elementos que pertenecerían a él así como la ubicación de las redes de distribución es la estrategia a seguir para su diseño; utilizando vigas frías para el enfriamiento de las oficinas, suelo radiante para calentarlas en invierno, etc., como por ejemplo en las propuestas de fachadas de este trabajo. Esto de por sí ya supondría un gran ahorro de energía, así como una forma de potenciar las bondades del sistema. Pero todo esto debe de estar unido a una estrategia común con los sistemas activos de instalaciones clásicos; pensando en cómo generar frío usando el calor del agua de los acristalamientos. Una opción muy interesante y eficiente, incluyendo sistemas activos de instalaciones, es a través de ciclos de refrigeración por absorción con máquinas de absorción de bromuro de litio.

La colocación de acristalamientos activos en toda la superficie de fachada debe de ser sustituida por una estrategia de usarlos en lugares específicos, donde la incidencia solar del verano sea mayor, sirviendo como sistema de protección solar. La bajada de iluminación natural, o al menos de la calidad de la misma, que supone el uso de estos sistemas tiene que considerarse de forma específica, ya que no interesa que aumente más la demanda de

energía de iluminación que la que se disminuye, en el caso de que el sistema se usara de forma generalizada.

La complejidad generada por la amplia gama de procesos ligados al sistema de fachada activa, desvela la necesidad de un buen sistema de control y una gran cantidad de sensores ambientales, que aseguren permutar los posibles procesos para las distintas situaciones en las que se necesiten refrigeración o calefacción en el interior. La zonificación del control y de las distintas áreas, también será fundamental, para conseguir el confort de forma simultánea en toda el área de oficinas.

Independientemente de que la fachada activa sea usando aire o agua como fluidos en sus cámaras, los sistemas asociados a la misma deben de estar separados a los sistemas de instalaciones de climatización del interior, permitiendo que ambos puedan funcionar de forma independiente, aunque con una obvia conexión y dependencia del segundo sistema respecto del primero. Esta duplicidad en equipos y trazados de líneas de distribución no debe tener un coste superior al ahorro generado.

Finalmente, la falta de conocimiento del tema en España hace que no se valoren seriamente estos sistemas como opciones reales para mejorar la sostenibilidad de un edificio. La ejecución de más casos reales de edificios de oficinas con fachadas activas en España, de pequeña o mediana escala, generará un mayor conocimiento alrededor de todos los elementos que rodean o que se pueden ver afectados por un sistema de fachada activa, así como generar una mayor confianza en nuevas opciones para conseguir un confort térmico interior con un bajo consumo energético.

## 5. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo se ha centrado en el estudio dentro de todos los sistemas activos de fachada, en las fachadas acristaladas, definiéndose como dobles acristalamientos con cámara de agua circulante en su interior. Se ha profundizado en los datos arrojados de las diferentes investigaciones existentes en la literatura científica y en su aplicación a prototipos o edificios existentes, hasta llegar a una síntesis en forma de propuesta teórica adaptada al clima mediterráneo.

Un trabajo que profundizara en la forma de simular este tipo de sistemas, creando un modelo numérico con la implementación de CFD (Computational Fluid Dynamics) o mecánica de fluidos computacional, sería el siguiente paso necesario dentro del proceso que supone una investigación de estas características; resultando además de gran interés, ya que arrojaría una gran cantidad de resultados sobre la propuesta realizada.

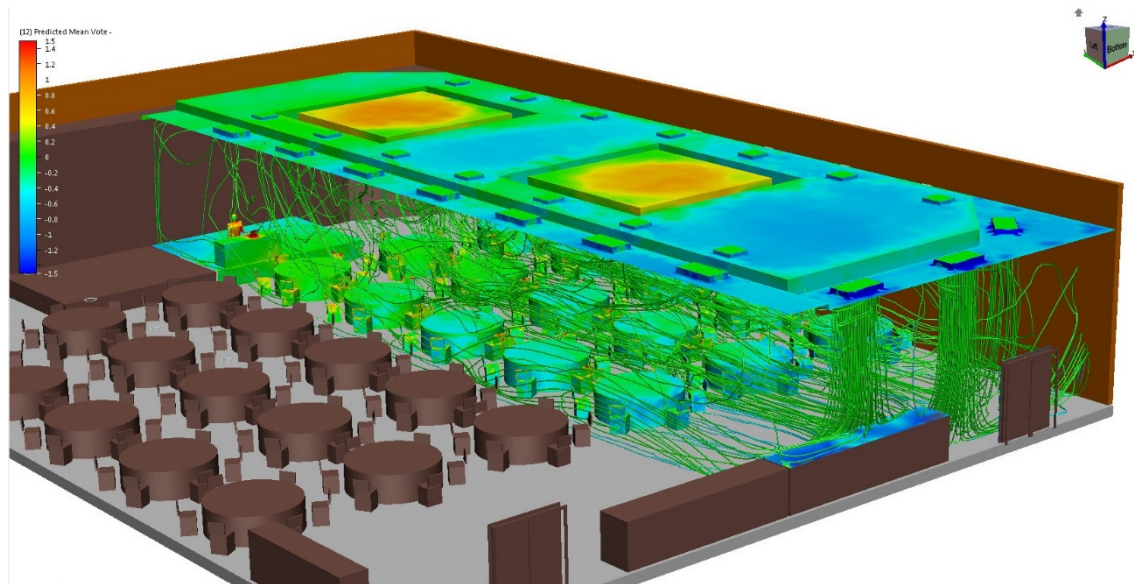


Figura 52: Imagen de software de simulación informática Autodesk Simulation CFD (Draw Bridge 2016)

Otra opción para avanzar desde el modelo teórico es la creación de prototipos con sistemas de control que simulen la propuesta. Estos prototipos servirán de modelos de medición y se podrían arrojar datos sobre la efectividad del sistema frente a otro prototipo modelo básico.

Sin investigar en estas dos vías propuestas, tras haber realizado una definición constructiva más precisa, es imposible estimar la validez del resultado, la eficacia de la propuesta o la rentabilidad económica de la misma.

## 6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

### Bibliografía

- Banham, Reyner. *La arquitectura del entorno bien climatizado*. Buenos Aires: Infinito, 1975.
- Benton, Tim, y Jean-Louis. Cohen. *Le Corbusier le grand*. London: Phaidon Press, 2008.
- Bianco, L., F. Goia, V. R. M. Lo Verso, y V. Serra. «Light and Energy Performance of an Active Transparent Façade : an Experimental Study in a Full Scale Office Room Mock-Up». En *CISBAT 2013*, 133-38. Lausanne, Switzerland, 2013.
- Chow, Tin Tai, Chunying Li, y Zhang Lin. «Thermal characteristics of water-flow double-pane window». *International Journal of Thermal Sciences*, n.º 50 (2011): 140-48.
- Chow, Tin tai, Chunying Li, y Zhang Lin. «Innovative solar windows for cooling-demand climate». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, n.º 94 (2009): 212-20.
- Chow, Tin Tai, Chunying Li, y Zhang Lin. «The function of solar absorbing window as water-heating device». Article. *Building and Environment*, n.º 46 (2011): 955-60.
- Claros Marfil, Luis J., Belén Pérez Pujazón, Graciela Ovando, Benito Lauret, y J. Francisco Padial. «Ventanas con cámara de agua circulante en edificios de consumo de energía casi nulo». En *1ª Bienal de Edificación y Urbanismo Sostenible*. Málaga: Greencities & Sostenibilidad: Inteligencia aplicada a la sostenibilidad urbana, 2013.
- Diarce, Gonzalo, Aitor Urresti, Ana García Romero, Alejandra Delgado, Aitor Erkoreka, César Escudero, y Álvaro Campos Celador. «Ventilated active façades with PCM». *Applied Energy*, n.º 109 (2013): 530-37.
- Díaz, José M, Fernando Del Ama Gonzalo, y Juan Antonio Hernández Ramos. «Active Double and Triple Glazing Thermal Shield in Façades». En *ASHRAE's Hot Climate Conference*, 195-202. Qatar, 2014.
- Eicker, U., V. Fux, U. Bauer, L. Mei, y D. Infield. «Façades and summer performance of buildings». *Energy and Buildings*, n.º 40 (2008): 600-611.
- Elarga, Hagar, Michele De Carli, y Angelo Zarrella. «A simplified mathematical model for transient simulation of thermal performance and energy assessment for active facades». *Energy and Buildings*, n.º 104 (octubre de 2015): 97-107.
- Ferrés, X., I. Fernández, G. Marshal, A. Lanchas, y J. Astudillo. «Chapas metálicas perforadas de control solar en fachadas ligeras». *Envolvente arquitectónica* 6 (2013): 06-10.
- Foster, Norman. *Norman Foster : works 4*. Editado por David Jenkins. Munich, 2004.

- Gil López, Tomas, y Carmen Giménez Molina. «Environmental, economic and energy analysis of double glazing with a circulating water chamber in residential buildings». *Applied Energy*, n.º 101 (2013): 572-81.
- Giménez Molina, Maria Del Carmen. «Cerramientos de vidrios especiales Análisis de aplicación en edificios sostenibles». *Dyna*, n.º 84 (2009): 71-75.
- Giménez Molina, Maria Del Carmen. «Alternativas para la mejora de la eficiencia energética de los acristalamientos : los vidrios dinámicos». Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, 2011.
- Guardo, A., M. Coussirat, E. Egusquiza, P. Alavedra, y R. Castilla. «A CFD approach to evaluate the influence of construction and operation parameters on the performance of Active Transparent Façades in Mediterranean climates». *Energy and Buildings*, n.º 41 (2009): 534-42.
- Hobsbawm, Eric. *The age of extremes: The short twentieth century, 1914-1991*. Vintage Books, 1994.
- Irulegi, O, A Serra, R Hernández, A Ruíz Pardo, y L Torres. «Fachadas ventiladas activas para reducir la demanda de calefacción en los edificios de oficinas. El caso de España». *Informes de la Construcción* 64, n.º 528 (2012): 575-85.
- Le Corbusier. *Quand les Cathédrales étaient Blanches*. París, 1937.
- Le Corbusier. «Centrosoyuz». Proyecto de arquitectura. Moscú, 1928.
- Li, Chunying. «Performance evaluation of water-flow window glazing». City University of Hong Kong, 2012.
- Lymperopoulou, Lydia. «Vidrios Estáticos Y Dinámicos: Estudio comparativo de la eficiencia energética de los edificios de oficina en clima mediterráneo a partir de la utilización de diferentes tipos de acristalamiento». Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, 2012.
- Muñoz Muñoz, Héctor. «Las ventanas de Le Corbusier : Del hueco al espacio». Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, 2015.
- Ramírez Balas, Cristina. «Soluciones innovadoras de fachadas para el acondicionamiento térmico de edificios». Universidad de Sevilla, s. f.
- Ramírez Balas, Cristina, Enrique D. Fernández Nieto, Gladys Narbona Reina, Juan José Sendra, y Rafael Suárez. «Numerical simulation of the temperature evolution in a room with a mur neutralisant. Application to "The City of Refuge" by Le Corbusier». *Energy and Buildings*, n.º 86 (2015): 708-22.
- Ramírez Balas, Cristina, Rafael Suárez, y Juan José Sendra. «Future technologies in Le Corbusier's environmental conditioning systems: City of Refuge in Paris». En *PLEA2013 - 29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future*. Munich, 2013.

- Renato, D'Alecon. «Fachadas transparentes: sistemas activos y pasivos». *ARQ*, n.º 84 (2013): 1-5.
- Requena Ruíz, Ignacio. «Medio ambiente y modernidad en la obra de Le Corbusier a través del dibujo». *EGA: expresión gráfica arquitectónica*, n.º 20 (2012): 246-55.
- Requena Ruíz, Ignacio. «Arquitectura adaptada al clima en el movimiento moderno: Le Corbusier (1930-1960)». Universidad de Alicante, 2011.
- Requena Ruíz, Ignacio, y Daniel Siret. «Construcciones ambientales para el hábitat moderno: Le Corbusier y André Missenard (1937-57)». En *Le Corbusier 50 años después, 1832-45*. Valencia, 2015.
- Scheerbart, Paul. *Glasarchitektur*. Book. Berlin, 1914.
- Slessor, Catherine. *Eco-tech : arquitectura hight-tech y sostenibilidad*. Barcelona: Gustavo Gili, 1997.

#### **Patentes** (por orden cronológico ascendente)

- Seemann, Robert A. 1982. All season window, issued 1982.
- Seemann, Robert A. 1983. All season window, issued 1983.
- Mckee, Frederick B. 1985. Windows. US4561221 A, issued 1985.
- Hernández Ramos, Juan Antonio, Miguel Hermanns, Fernando Del Ama Gonzalo, y César Javier Hernández Jiménez. 2009. Active transparent or translucent enclosures with energy control capacity. PCT ES/2008/000071, issued 2009.

#### **Normativa**

- CTE. *Documento Básico HE: Ahorro de Energía*. España, 2013.
- Ministerio de Industria, Energía y Turismo. *RD 235/13*, 2013.
- Parlamento europeo y Consejo de la Unión Europea. *Directiva 2012/27/UE. Diario Oficial de la Unión Europea*, 2012.

#### **Páginas web**

- Comisión Europea. «Comisión Europea». Accedido 27 de marzo de 2016.  
[http://ec.europa.eu/energy/efficiency/buildings/buildings\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/efficiency/buildings/buildings_en.htm).



- CTE. «CTE-DB-HE». Accedido 20 de julio de 2016.  
<http://www.codigotecnico.org/index.php/menu-ahorro-energia>.
- Draw Bridge. «Draw Bridge». Accedido 10 de mayo de 2016.  
<http://www.drawbridge.com.my/simulation-cfd>.
- Foster and Partners. «Foster and Partners». Accedido 2 de septiembre de 2016.  
<http://www.fosterandpartners.com/projects/business-promotion-centre/>.
- Intelliglass. «Intelliglass». Accedido 15 de abril de 2016. <http://www.intelliglass.es/>.
- Jjureidini. «jjureidini blog». Accedido 31 de agosto de 2016.  
<https://jjureidini.wordpress.com/2011/01/18/trombe-wall-case-studies/>.
- Plataforma Arquitectura. «Edificio Pitágoras y Sede Tecnova». Accedido 2 de septiembre de 2016. <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-227124/edificio-fundacion-tecnova-ferre-arquitectos>.
- UCLM. «Universidad de Castilla La Mancha». Accedido 2 de septiembre de 2016.  
<https://www.uclm.es/CU/periodismo/>.
- WWF. «La humanidad agota hoy el presupuesto ecológico del planeta para 2015». Accedido 20 de julio de 2016. <http://www.wwf.es/?35820/La-humanidad-agota-hoy-el-presupuesto-ecolgico-del-planeta-para-2015>.

## 7. APÉNDICE

### Índice de ilustraciones

[Figura 01]: Diagrama de distribución y consumo energético en España (IDEA, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2015); Página 06.

[Figura 02]: Diagrama de consumo energético en edificios terciarios (2008) y de vivienda (2011) en España (IDEA, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2015); Página 06.

[Figura 03]: Detalles del proyecto Centrosoyuz (Le Corbusier 1928); Página 11.

[Figura 04]: Esquema descriptivo el muro neutralizante (Le Corbusier 1928); Página 12.

[Figura 05]: Fachada de vidrio de la Cité de Refuge. (Benton y Cohen 2008); Página 12.

[Figura 06]: Cámara de prueba para el mur neutralisant y la respiration exacte en Saint Gobain, 1931. Sección.(Banham 1975); Página 14.

[Figura 07]: Cámara de prueba para el mur neutralisant y la respiration exacte en Saint Gobain, 1931. Planta. (Banham 1975); Página 14.

[Figura 08]: Casa Comuna Narkofin, 1932 (Ramírez Balas, s. f.); Página 15.

[Figura 09]: Sistema Thermopane, anunciado como “Daylight Walls”(Ramírez Balas, s. f.); Página 16.

[Figura 10]: Detalle del cerramiento del Banco de Copenhague, 1950 (Ramírez Balas, s. f.); Página 17.

[Figura 11]: Casa Solar en Odellio, Francia. Diseñada por Félix Trombe, incorporando el sistema del Muro Trombe, 1960. Fotografía. (Jjuraidini 2016); Página 18.

[Figura 12]: Casa Solar en Odellio, Francia. Diseñada por Félix Trombe, incorporando el sistema del Muro Trombe, 1960. Esquema del sistema. (Jjuraidini 2016); Página 18.

[Figura 13]: Detalle del funcionamiento del Scottish Widow Headquarters, 1962 (Ramírez Balas, s. f.); Página 18.

[Figura 14]: Esquemas de la patente “All season window” de Seemann, 1982 (Seemann 1982); Página 20.

[Figura 15]: Esquemas de la patente “Windows” de McKee, 1985. Detalle. (McKee 1985); Página 21.

[Figura 16]: Esquemas de la patente “Windows” de McKee, 1985. Esquema del circuito secundario. (McKee 1985); Página 21.

[Figura 17]: Esquemas de la patente “Cerramientos activos transparentes o translúcidos con capacidad de gestión de energía”, 2009. (Hernández Ramos et al. 2009); Página 22.

[Figura 18]: Interior del Business Promotion Center en el Parque Microelectrónico de Duisburg. Diseñado por Norman Foster, 1988 (Foster and Partners 1988); Página 23.

[Figura 19]: Interior del Business Promotion Center en el Parque Microelectrónico de Duisburg. Diseñado por Norman Foster, 1988 (Foster and Partners 1988); Página 23.

[Figura 20]: Aspecto exterior de la fachada del Business Promotion Center del Parque Microelectrónico de Duisburg. Diseñado por Norman Foster, 1988 (Foster and Partners 1988); Página 24.

[Figura 21]: Esquema de funcionamiento de la fachada como sistema activo en el Business Promotion Center del Parque Microelectrónico de Duisburg. Diseñado por Norman Foster, 1988 (Foster and Partners 1988); Página 24.

[Figura 22]: Detalle de la fachada del Business Promotion Center del Parque Microelectrónico de Duisburg. Diseñado por Norman Foster, 1988 (Ramírez Balas, s. f.); Página 25.

[Figura 23]: Fotografía tomada del experimento realizado en 2009 en Guadalajara. (Claros Marfil et al. 2013); Página 26.

[Figura 24]: Edificio polivalente de la Facultad de Periodismo de la Universidad de Castilla La Mancha. Proyecto de 2010. (UCLM 2016); Página 27.

[Figura 25]: Detalles de la red hidráulica del sistema activo de fachada (Intelliglass 2016); Página 28.

[Figura 26]: Detalles de la red hidráulica del sistema activo de fachada (Intelliglass 2016); Página 28.

[Figura 27]: Aspecto interior del sistema activo de fachada (Intelliglass 2016); Página 29.

[Figura 28]: Esquema de principio de los sistemas involucrados en el sistema de fachada activa. (Díaz, Del Ama Gonzalo, y Hernández Ramos 2014); Página 29.

[Figura 29]: Esquema de funcionamiento del sistema de acristalamiento de doble capa con cámara de agua circulante. (T. T. Chow, Li, y Lin 2011a); Página 31.

[Figura 30]: Esquema de principio del uso de ventanas como colectores solares. (T. T. Chow, Li, y Lin 2011a); Página 31.

[Figura 31]: Modelos en creados en Hong Kong para el estudio de resultados. Modelos con vidrios verticales e inclinados. (Li 2012); Página 32.

[Figura 32]: Modelos en creados en Hong Kong para el estudio de resultados. Modelos con vidrios verticales e inclinados. (Li 2012); Página 32.

[Figura 33]: Gráfica de las temperaturas de los módulos gestionados por el sistema de control. (Claros Marfil et al. 2013); Página 33.

[Figura 34]: Gráfica de las temperaturas del estudio de un día en el que la universidad se encontraba cerrada (Caso A) y otro con la universidad abierta (caso B), ambos en condiciones de verano. Línea verde: temperatura interior. Línea negra: temperatura exterior. Líneas azul y cian: temperatura de impulsión y retorno del circuito primario de agua. Líneas naranja y marrón: temperatura de impulsión y retorno del depósito de agua de acumulación. (Díaz, Del Ama Gonzalo, y Hernández Ramos 2014); Página 34.

[Figura 35]: Imagen exterior del edificio de oficinas Pitágoras (Plataforma Arquitectura 2013); Página 36.

[Figura 36]: Planta Tipo del edificio de oficinas (Fuente: Proporcionado por los arquitectos al autor, 2016); Página 36.

[Figura 37]: Esquema del funcionamiento térmico del edificio (Fuente: Proporcionado por los arquitectos al autor, 2016); Página 37.

[Figura 38]: Ejemplos de usos de acabados claros, fachadas ventiladas y protecciones solares en el Edificio Pitágoras (Plataforma Arquitectura 2013); Página 38.

[Figura 39]: Ejemplos de usos de acabados claros, fachadas ventiladas y protecciones solares en el Edificio Pitágoras (Plataforma Arquitectura 2013); Página 38.

[Figura 40]: Ejemplos de usos de acabados claros, fachadas ventiladas y protecciones solares en el Edificio Pitágoras (Plataforma Arquitectura 2013); Página 38.

[Figura 41]: Esquema del funcionamiento térmico del edificio: ventilaciones (Fuente: Proporcionado por los arquitectos al autor, 2016); Página 39.

[Figura 42]: Mecanismos de transferencia de calor en una ventana con cámara de agua circulante (T. tai Chow, Li, y Lin 2009); Página 40.

[Figura 43]: Datos mensuales de cargas del sistema de refrigeración en el caso de oficinas, dependiendo del tipo de ventana usado (Li 2012); Página 43.

[Figura 44]: Esquema de principio de la instalación (Intelliglass 2016); Página 44.

[Figura 45]: Esquema de principio de la instalación en verano y gráfica de resultados (Intelliglass 2016); Página 45.

[Figura 46]: Esquema de principio de la instalación en verano y gráfica de resultados (Intelliglass 2016); Página 45.

[Figura 47]: Definición constructiva. Escala 1:40m (Elaboración propia); Página 48.

[Figura 48]: Esquema del funcionamiento térmico del edificio de oficinas en verano (Elaboración propia); Página 49.

[Figura 49]: Esquema del funcionamiento térmico del edificio de oficinas en invierno en orientaciones sur-este-oeste (Elaboración propia); Página 50.

[Figura 50]: Esquema del funcionamiento térmico del edificio de oficinas en invierno en orientación norte (Elaboración propia); Página 51.

[Figura 51]: Esquema del funcionamiento térmico del edificio de oficinas en primavera y otoño en situaciones de free-cooling (Elaboración propia); Página 52.

[Figura 52]: Imagen de software de simulación informática Autodesk Simulation CFD (Draw Bridge 2016); Página 55.

### **Índice de tablas**

[Tabla 01]: Resultados obtenidos para las distintas versiones estudiadas. (T. tai Chow, Li, y Lin 2009); Página 40.

[Tabla 02]: Datos previos para caracterizar cada uno de los usos estudiadas (Li 2012); Página 41.

[Tabla 03]: Datos mensuales en el caso del sistema vertical (Li 2012); Página 42.

[Tabla 04]: Datos mensuales de ganancias térmicas interiores en el caso de oficinas, dependiendo del sistema usado (Li 2012); Página 43.

[Tabla 05]: Datos para el diseño del sistema de fachada en oficinas (Elaboración propia); Página 46.

*Agradecimientos especiales a Cristina Ramírez Balas, por entregarme una gran cantidad de material, especialmente el capítulo del estado del arte de la tesis sobre la que está trabajando, sirviendo de base sobre la que se empezó a generar este trabajo.*

*A Juan José Sendra Salas por toda la literatura científica suministrada con el objetivo de completar la formación de un rico y variado estado del arte, parte primordial del desarrollo de este trabajo.*

*Al resto de profesores del tribunal y a mis compañeros de clase por la ayuda prestada en la organización del trabajo y presentación del mismo.*

*A Daniel Mantas y Soraya Hoogendijk cuyo tenaz apoyo han posibilitado la finalización de este trabajo.*