



El vidrio activo con cámara de agua y la inercia térmica en los edificios

Active Water-flow Glazing and thermal Inertia in Buildings

Fernando del Ama Gonzalo^[1], Carlota Sáenz de Tejada^[2] y Juan A. Hernández Ramos^[3]

^[1] College of Engineering, Alfaisal University, Riyadh (Arabia Saudi)

^[2] Escuela Politécnica Superior, Universidad CEU San Pablo, Madrid

^[3] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio, Universidad Politécnica, Madrid

Traducción [Translation](#) Fernando del Ama Gonzalo, Carlota Sáenz de Tejada y Juan A. Hernández Ramos

Palabras clave [Keywords](#)

Eficiencia energética, vidrios activos con cámara de agua en circulación, capacidad calorífica, inercia térmica
[Energy efficiency in buildings, active water-flow glazing, heat capacity, thermal inertia](#)

Resumen

El vidrio, como elemento fundamental en el diseño de la arquitectura, se enfrenta a los tradicionales problemas de excesivas ganancias energéticas en verano y pérdidas exageradas en invierno.

El vidrio activo con agua en circulación proporciona el control de la carga térmica que incide sobre una fachada gracias a la circulación ascendente del agua a través de la cámara entre paños. El agua no solo absorbe la radiación infrarroja sino que reduce la temperatura del vidrio interior sin renunciar a su transparencia. Aporta asimismo inercia térmica al cerramiento y un gran potencial para absorber energía y trasladarla, haciendo de los vidrios activos una solución especialmente indicada en climas cálidos.

Este texto expone las bases del comportamiento energético y posibilidades de esta tecnología, mostrando los resultados de simulaciones de una edificación que la implementa en su fachada sur.

Abstract

Glass, as a fundamental element in architectural design, faces the traditional challenges of excessive heat gains in the summer and exaggerated heat losses in the winter.

Active water-flow glazing provides control over the thermal load striking the surface, without compromising on transparency. The upward circulating water through the chamber both absorbs infrared radiation and reduces the temperature of the interior glass pane. Alongside, it provides thermal inertia to the window and a great potential to absorb and transport energy, making active glazing especially suitable for warm climates.

This text poses the foundations of this technology's energy performance and possibilities, showing the results from simulations carried out for a building with active water-flow glazing in its south façade.

La energía solar que incide sobre la superficie terrestre depende de los movimientos de rotación y traslación de la tierra y también de las condiciones meteorológicas de cada lugar. En muchas ocasiones no coincide la necesidad de energía con la disponibilidad. Generalmente se requiere más energía, precisamente, cuando no hay radiación solar. Esto hace necesario que prácticamente todos los sistemas fototérmicos requieran algún tipo de almacenamiento para poder satisfacer las demandas en el momento en que sean requeridas. Estos sistemas de almacenamiento pueden estar incorporados en los distintos componentes de un edificio. Así, forjados, muros o cimientos son elementos colectores y almacenes de energía. El tipo de almacenamiento de energía utilizado en estos sistemas es generalmente por calor sensible (cambios de temperatura de los distintos componentes del edificio). Debido a que en estos sistemas las temperaturas de almacenamiento son bajas, usualmente menores de 40°C, se requiere de grandes volúmenes del material que sirve como almacén. La capacidad de almacenamiento de un material viene determinada por dos de sus propiedades: la densidad y el calor específico. La ventaja del agua sobre los materiales pétreos es que tiene una gran capacidad calorífica y, por tanto, tiene más capacidad de almacenamiento por unidad de volumen que los materiales mencionados. Además el agua no sólo tiene la propiedad de almacenar sino que también puede transportar energía calorífica.

Por otra parte, el vidrio ha fascinado siempre al arquitecto ya que durante siglos ha sido el único material transparente que se podía usar en los edificios. Siempre que se ha producido una evolución en la tecnología de la construcción, el vidrio ha sido el material protagonista. La evolución del románico al gótico supone llevar el vidrio a las fachadas que, liberadas de su compromiso resistente, pudieron aportar a la arquitectura la luz y el color. La necesidad de crear amplios invernaderos en el siglo XIX fue el origen de otra revolución estructural. Esta innovación liberó la diferencia entre vano y macizo y fue el germen del empleo del vidrio con criterios actuales. El vidrio fue elemento primordial en las creaciones de los maestros del Movimiento Moderno, que propagaron los criterios de iluminación, relación visual entre interior y exterior, ventilación y planta libre. Después de la Segunda Guerra

The solar energy that strikes the Earth's surface depends on the rotational and translational movements of the Earth, as well as the meteorological conditions of each place. In many occasions, the need for energy does not match the availability. Generally, more energy is required precisely when there is no solar radiation. This forces practically every photothermal system to have some type of storage to satisfy the demand whenever it is required. These storage systems can be incorporated in the different components of the building; slabs, walls or foundations are collector elements and energy storage units. The type of energy storage used in these systems is generally through sensitive heat (temperature changes in the different components of the building). Due to the fact that the storage temperatures in these systems are low, usually below 40°C, a large volume of storing material is required. A material's storage capacity is determined by two of its properties: density and specific heat. The advantage of water over other stone materials is its great heat capacity, hence more storage capacity per unit of volume than the materials mentioned. Alongside, water not only has the ability to store; it can also transport heat energy.

Furthermore, glass has always fascinated architects, since for centuries it was the only transparent material usable in construction. In every building technology evolution, glass has played a main role. The evolution from Romanesque to Gothic meant placing the glass on the façades, which were free from their load-bearing commitment and able to provide the Architecture with light and color. The need to create large greenhouses in the 19th century was the origin of another structural revolution: the use of smelting to develop lighter structures, enclosing them with glass. This innovation diffused the difference between void and mass, and was the seed for the use of glass with nowadays criteria. Glass was a main

Mundial se desarrolla el concepto de fachada ligera anclada a los forjados horizontales, que se generalizó en la segunda mitad del siglo xx.

Sin embargo, desde el punto de vista del consumo energético, los edificios acristalados cuentan con poca inercia térmica en su envolvente y manifiestan serios problemas durante su vida útil: exceso de pérdidas energéticas en invierno y ganancias solares exageradas en verano.

Para solucionar el problema de las excesivas pérdidas en invierno existen tratamientos de capa que reducen la emisividad del vidrio para retener el calor del interior. (1) La actuación en la cámara puede mejorar la capacidad aislante del conjunto del doble acristalamiento. (2) También se puede rellenar la cámara con gas inerte, o hacer el vacío, con lo que se reduce la transmitancia en grandes superficies acristaladas. (3) Los vidrios termocrómicos y electrocrómicos pueden variar su color y transparencia reaccionando ante el exceso de luz y de calor. (4) Actualmente se pueden diseñar y fabricar dobles acristalamientos en los que el vidrio exterior fotovoltaico produzca electricidad. (5) Por otro lado, se pueden desarrollar dobles acristalamientos donde el fluido de la cámara, en vez de ser un gas inerte, sea agua en circulación de tal manera que pueda absorber el calor de la radiación solar directa. (6) (7) Ejemplo de ello es el sistema de 'Cerramientos transparentes o translúcidos activos con capacidad de gestión energética' patentado por Intelliglass SL (8) El calor absorbido puede ser almacenado en depósitos de inercia o puede ser recirculado a zonas deficitarias de energía en el mismo edificio, mejorando las condiciones de confort térmico en el interior.

El reto de la arquitectura para el futuro ya está planteado. El 'diseño regenerativo' implica una actitud proactiva del edificio y va más allá de la práctica tradicional de diseño sostenible. Los edificios regenerativos no solamente reducen su consumo de energía a cero, sino que recolectan, generan y distribuyen recursos renovables a su alrededor, mejorando el balance ambiental de su entorno. (9) El vidrio será un elemento fundamental en el diseño de estos edificios regenerativos.

element in the masters of the Modern Movement's creations, which propagated the concepts of lighting, visual relation between interior and exterior, ventilation and free plan. After Second World War, the concept of a light façade anchored to the horizontal slabs was developed, becoming widespread in the second half of the 20th century.

However, from the energy consumption point of view, the glazed buildings have very low thermal inertia in their envelope, and show serious problems during their lifetime: excessive heat loss in winter, and exaggerated heat gain in summer.

To solve the problem of excessive loss in the winter, certain layer coatings have been developed in order to reduce the emissivity of the glass, and to retain the heat charge inside. (1) Acting in the chamber can improve the insulation capacity of the double-glazed windows. (2) The chamber can also be filled with inert gas, or vacuumed, in order to reduce the transmittance in large glazed surfaces. (3) Thermochromic and electrochromic glazing vary in color and transparency as a reaction to light and heat excess. (4) Double-pane windows, in which the exterior photovoltaic pane produces electricity, can be designed and produced today. (5) Double-pane windows can also be developed with circulating water through the chamber, instead of inert gas, allowing the water to absorb the heat of direct solar radiation. (6) (7) An example of this is the system of 'Active transparent or translucent enclosures with energy control capacity' by Intelliglass SL (8) The heat absorbed can be stored in buffer tanks or re-directed to other areas of the building with energy demand, increasing the thermal comfort conditions in the interior space.

En este trabajo se van a exponer los resultados de la simulación de una edificación con vidrio con cámara de agua en la fachada sur y un depósito de agua enterrado para controlar la inercia del edificio. Se va a presentar el sistema de ecuaciones que rigen la evolución de las temperaturas de todos los elementos que intervienen en el sistema. Por último, se estudiarán los resultados de una simulación energética durante un año en un edificio que se climatiza con el calor acumulado en los depósitos de inercia y, por consiguiente, sin gasto energético alguno. Se estudiará asimismo, basado en los valores resultantes de la simulación, el ahorro energético que supone hacer circular el agua por la cámara.

Vidrios activos con cámara de agua en circulación. La arquitectura actual dota a los edificios de grandes superficies acristaladas para incrementar la luminosidad de los mismos. Sin embargo, el vidrio es un mal aislante térmico que además permite el paso de gran parte de la radiación solar. Todo ello incrementa en gran medida el gasto de energía en climatización.

Para solventar los problemas energéticos que plantea el uso del vidrio en la edificación han ido surgiendo toda una serie de nuevas tecnologías: acristalamientos dobles y triples, tratamientos de capa, vidrios de control solar, vidrios de baja emisividad, etc. Pero el principal inconveniente de estas soluciones radica en la falta de inercia térmica de estos cerramientos ligeros. Los acristalamientos activos con cámara de agua combinan la transparencia y ligereza del vidrio con la inercia térmica de soluciones pesadas y opacas.

La principal característica de estos acristalamientos activos es su cámara de agua en circulación. Debido a sus propiedades espectrales, el agua captura la mayor parte de la radiación solar infrarroja, dejando pasar la componente visible. Esto hace que los acristalamientos presenten la misma luminosidad que un acristalamiento convencional, disminuyendo al mismo tiempo el flujo de calor hacia el interior. Además, la circulación del agua permite utilizar, almacenar o disipar la energía capturada según convenga. Todo esto permite a los edificios equipados con acristalamientos activos emplear estrategias de ahorro energético que no son posibles con acristalamientos o cerramientos convencionales.

Architecture's challenge for the future has already been posed. The 'regenerative design' implies a proactive attitude of the building beyond the traditional sustainable design practice. Regenerative buildings not only reduce their energy consumption to zero, but they recollect, generate and distribute renewable resources, improving the environmental balance in their surroundings. (9) Glass will be a fundamental element in the design of these regenerative buildings.

This paper will present the results from a simulation of a building with active water-flow glazing on its south façade and an underground water tank to control the building's thermal inertia. Alongside, the set of equations that govern the temperature evolution of all the elements involved in the system will be presented. Lastly, the results for a one-year energy simulation of a building which is climate-controlled with the heat accumulated in the buffer tanks, therefore with no energy expense what so ever, will be studied. It will study as well, based on the resulting values of the simulation, the energy saved by making the water circulate through the chamber.

Active water-flow glazing. Architecture nowadays gives buildings large glazed surfaces to increase their luminosity. However, glass is a poor thermal insulator and allows great part of the solar radiation to pass through. This all strongly increases the energy expense in climate-control.

To overcome the energy problems of using glass in buildings, a variety of new technologies has emerged: double and triple-pane glazing, layer coatings, solar control glass, low-emissivity glass, etc. The main disadvantage of these solu-

La aplicación más interesante de este sistema de vidrios activos es su uso en exteriores: fachadas, muros cortina, lucernarios y cubiertas. Es aquí donde pueden aprovecharse plenamente sus características para reducir el consumo de energía (especialmente en aquellos edificios con grandes superficies acristaladas). En estos edificios, la carga térmica por radiación supone gran parte del gasto de climatización. Los acristalamientos activos actúan disminuyendo la radiación que penetra al recinto. Además al contrario que en otro tipo de soluciones como los vidrios de control solar, dicha radiación no es expulsada hacia el exterior, sino que es capturada por el agua. Esto permite desarrollar toda una nueva serie de estrategias, como almacenamiento estacional o diario de energía en depósitos de inercia, la homogeneización de fachadas, el amortiguamiento de la onda térmica en el acristalamiento y técnicas de enfriamiento nocturno. Todas estas técnicas o estrategias contribuyen a reducir el consumo energético de un edificio.

EL AGUA COMO ALMACENADORA DE ENERGÍA. Diversos tipos de materiales líquidos, sólidos y combinaciones de éstos pueden almacenar energía por cambios de temperatura. Esta energía almacenada es igual al cambio de energía interna que sufre el material al cambiar su temperatura y equivale al calor sensible (Qs).

Una regla de tipo práctico para determinar si un material es apropiado para ser utilizado como medio de almacenamiento es que éste debe ser capaz de almacenar, como mínimo, entre 300 y 600 kJ/°C·m² de área de colector. También encontramos que cuanto mayor sea la temperatura que pueda alcanzar el medio de almacenamiento, tanto menor será el tamaño del sistema (aunque las pérdidas se hacen más evidentes). Por ejemplo, 1.000 litros de agua pueden almacenar aproximadamente 84 MJ de energía cuando su temperatura aumenta de 30 a 50°C y 168 MJ cuando la temperatura varía de 30 a 70°C. Nótese que se requieren aproximadamente 2,5 m³ de rocas para almacenar la misma cantidad de energía con los mismos incrementos de temperatura.

El agua es el medio ideal de almacenamiento para sistemas activos y pasivos, debido a que tiene una gran capacidad calorífica y por lo tanto mayor capacidad de almacenamiento. El agua puede almacenar casi cinco veces más energía (4.186 kJ/kg·°C) que la que puede almacenar la misma masa de roca

tions lies in the lack of thermal inertia of these light enclosures. The active water-flow glazing combines the transparency and lightness of the glass with the thermal inertia of heavy and opaque solutions.

The main characteristic of this active glazing is its water-flow chamber. Due to its spectral properties, the water captures most of the solar infrared radiation, letting the visible component through. This makes the glazing as luminous as a conventional one, though at the same time reducing the heat flow towards the inside of the building. Moreover, the circulation of the water allows the buildings that are equipped with active glazing to apply energy saving strategies which would not be possible with conventional glazing.

The most interesting application of this active glazing system is its use in exteriors: façades, curtain-walls, skylights and roofs. It is there where its characteristics can be fully exploited to reduce the energy consumption (especially in those buildings with large glazed surfaces). In these buildings, the thermal load by radiation represents much of the climate-control expense. The active glazing acts by reducing the radiation than enters the space. Unlike with other solutions such as solar control glazing, with water-flow glazing the radiation is not sent back to the exterior; it is captured by the water. This allows for a whole new range of strategies, such as seasonal or daily energy storing in buffer tanks, homogenization of façades, damping of the glazing's thermal wave and nocturnal cooling techniques. All of these techniques or strategies contribute to a reduction in a building's energy consumption.

o piedra (0.88 kJ/kg-°C). Además, el medio de transporte de energía se hace a través de la misma agua.

LA IMPORTANCIA DE LA INERCIA TÉRMICA. Esta propiedad de los materiales se aprovecha para que la temperatura del interior de los edificios permanezca estable a lo largo del día. En invierno, si los muros y las cubiertas de los edificios cuentan con una gran masa, durante el día se calientan y por la noche van cediendo el calor al ambiente del local. En verano, durante el día absorben el calor y por la noche se vuelven a enfriar con una ventilación adecuada, para prepararlos para el día siguiente. Un adecuado uso de esta propiedad puede reducir el uso de energía en los sistemas de climatización. La arquitectura popular española siempre ha sido sensible a esta característica de nuestro clima y es común encontrar gruesos muros de piedra o de adobe en edificios de zonas calurosas.

Los edificios con cerramientos ligeros manifiestan grandes oscilaciones de temperatura a lo largo del día, sobre todo si están expuestos a la radiación solar. Por otra parte, estas grandes variaciones de temperatura hacen que el sistema de climatización deba ser dimensionado en condiciones de carga pico, lo que implica un aumento en el consumo de la energía necesaria para la climatización, sobre todo en verano. Los cerramientos de vidrio no son ajenos a este tipo de problemas y añaden otro más: el paso de radiación solar a través de ellos. Esto provoca zonas con diferentes condiciones de temperatura en el interior de una misma sala, con la consiguiente falta de confort que sufren las personas que la ocupan.

La tecnología del vidrio activo trata de solucionar los problemas de excesivo gasto y de falta de confort asociados a los cerramientos de vidrio tradicionales. La inercia térmica en este sistema se desvincula del cerramiento y se puede llevar a pilotes geotérmicos, depósitos enterrados, aljibes o piscinas que pueden estar integrados en la cimentación o en el entorno del edificio. Otra ventaja de los vidrios activos radica en que son compatibles con otros sistemas de climatización como los fan-coil, el suelo radiante, el techo frío o las cimentaciones activas.

WATER AS AN ENERGY STORAGE. Several types of liquids, solids or materials which combine them, can store energy by temperature changes. This stored energy is the same as the change in the internal energy that the material suffers when its temperature changes, and is equivalent to the sensitive heat (Qs).

A practical rule to determine if a material is appropriate to be used as storage medium is that the material should be able to store, at least, between 300 and 600 kJ/°C-m² of collector area. We also find that the higher the storage temperature the medium can reach, the smaller the size of the system (although the losses become more evident). For instance, 1,000 liters of water can store approximately 84 MJ of energy when its temperature increases from 30 to 50°C, and 168 MJ when the temperature varies between 30 and 70°C. It should be noted that about 2.5 m³ of stone is required to store the same amount of energy with the same temperature gradients.

Water is the ideal storage medium for active and passive systems, since it has a great heat capacity and therefore a larger capacity to store. Water can store almost five times more energy than the same mass of rock or stone could store (0.88 kJ/kg-°C). Moreover, the energy transportation means is the water itself.

THE IMPORTANCE OF THERMAL INERTIA. This property of materials is exploited so that the interior temperature of the buildings remains stable throughout the day. In the winter, if the walls and roofs of the building have a great mass, during the day they will warm up and during the night they will release the heat to the local environment. In the summer, during the day they

Por último, la inercia térmica de los vidrios con cámara de agua en circulación es variable. Esta propiedad es muy interesante ya que en inviernos soleados puede interesar que la radiación solar caliente de forma gratuita el interior. En estos casos basta con parar la circulación del agua por la cámara y el calor del sol se cederá al interior. Cuando la radiación solar resulte excesiva, se aumenta el caudal y el exceso de energía se disipa en los depósitos enterrados o en la piscina.

EL COMPORTAMIENTO DEL VIDRIO ACTIVO EN FACHADAS Y CUBIERTAS.

El vidrio activo con cámara de agua en circulación es especialmente adecuado para envolventes arquitectónicas de edificios ubicados en climas cálidos. (10) Gracias al apantallamiento de la radiación solar por el agua, se evita el efecto invernadero en el interior. El triple acristalamiento combina un elevado aislamiento, una gran capacidad de bloqueo de la radiación infrarroja y una alta transmisión lumínica. El vidrio activo colocado en la fachada y en los lucernarios bloquea el paso de la radiación solar directa, que es del orden de 500-1.000 W/m². Así, el calor aportado o evacuado por la cámara de agua en circulación deberá ser aportado o evacuado por el intercambiador de calor y, posteriormente, por los pilotes geotérmicos o los depósitos de inercia. En invierno, si consideramos una temperatura interior de confort de 20°C, las pérdidas a través del acristalamiento exigen un caudal de circulación por los vidrios de fachada mucho menor que en el caso de verano. Si la temperatura del agua se sitúa por encima de la temperatura de confort, la envolvente de vidrio se convierte en un radiador de calor hacia el interior del edificio. Con respecto al ahorro energético, la instalación de estos vidrios en los huecos de la fachada, combinada con un sistema de producción de energía gratuito, reduce el consumo energético asociado a la calefacción o la refrigeración del edificio entre un 40 y un 70%.

Se trata de una tecnología emergente y los ejemplos construidos fuera de laboratorio e incorporados a una edificación han surgido a partir de 2011. Tiene poco recorrido en el mercado, por lo que su proceso no ha sido todavía industrializado y su instalación supone un alto coste. Existen además restricciones en el tamaño de los paños, debido a la presión hidrostática.

absorb heat and at night they cool again with adequate ventilation, in order to prepare for the next day. An appropriate use of this property can reduce the energy use of the climate-control systems. Spanish Popular Architecture was always sensitive to this characteristic of our climate, and it is common to find thick stone or adobe walls in buildings located in warm areas.

Buildings with light enclosures show great temperature oscillations throughout the day, especially if they are exposed to solar radiation. In addition, these large temperature variations force the climate-control system to be dimensioned for peak-load conditions, hence increasing the energy consumption needed to heat or cool, especially in the summer. Glazed enclosures are no stranger to these problems, in fact they add another one: the solar radiation trespassing them. This produces areas with different temperature conditions within a same room, resulting in a lack of comfort for the users.

The active glazing technology seeks to address the problems of excessive expense and lack of comfort associated to traditional glazed enclosures. The thermal inertia in this system dissociates from the enclosure, and can be driven to geothermal piles, underground tanks or pools, which can be part of the building's foundation or its surrounding. Another advantage of this active glazing comes from the fact that it is compatible with other climate-control systems such as fan-coils, radiant floors, cooling ceilings or active foundations.

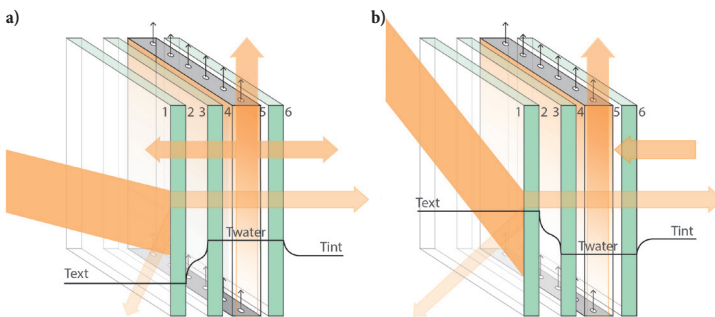
Lastly, the thermal inertia of the water-flow glazing is variable. This property is quite interesting, since in sunny winter days it might be suitable for the solar radiation to heat the interior at no expense. In this case, by turning

Actualmente se está estudiando la combinación de diferentes tipos de vidrio entre sus capas para multiplicar sus posibilidades. (6)

En la imagen (Fig. 1) se observa el comportamiento del triple acristalamiento al exterior en condiciones de verano y de invierno. En verano el calor debido a la radiación solar es absorbido por la cámara de agua. Si la temperatura de esta cámara es inferior a la del interior, se puede eliminar la carga interna debida a la ocupación de personas y a los equipos. En invierno la cámara de aire minimiza las pérdidas de energía hacia el exterior y, si la temperatura del agua es mayor que la del interior, la fachada puede funcionar como un radiador transparente.

Cuando los vidrios activos se colocan en una fachada expuesta al sol, la radiación se transforma en energía calorífica que eleva la temperatura del agua. La circulación forzada del agua transporta el calor absorbido hasta el intercambiador de calor. Este elemento se encarga de enfriar el agua antes de su retorno a la cámara. Para niveles de radiación solar entre 500-1.000 W/m², un caudal de agua en la cámara entre 0.05-0.1 kg/(s m²) es suficiente para transportar todo el calor absorbido por el agua y asegurar variaciones de temperatura en la cámara menores de cinco grados centígrados. De esta manera se consigue una cámara de agua isoterma que bloquea el paso de la radiación infrarroja. En ausencia de radiación solar exterior se hace circular agua por la cámara a una temperatura específica controlada por la temperatura del intercambiador de calor. El calor

Fig. 1. Comportamiento del triple acristalamiento activo en verano e invierno. a) invierno; b) verano.



off the circulation of the water through the chamber, the heat from the Sun will be transferred inside. When the solar radiation becomes excessive, the flow can be increased and the energy excess is dissipated in the underground tanks or in the pool.

ACTIVE GLAZING PERFORMANCE ON FAÇADES AND ROOFS. Active water-flow glazing is especially suitable for architectural envelopes of buildings located in warm climates. (10) Thanks to the water blocking the solar radiation, the greenhouse effect inside the building is avoided. The triple-glazing combines a high insulation, a great capacity to block infrared radiation and a high light transmission. The active glazing placed on façades and on skylights blocks the direct solar radiation, which is in the range of 500-1,000 W/m². This way, the heat provided or evacuated by the flowing water chamber must be supplied or evacuated by the heat exchanger, and later by the geothermal piles or by the buffer tanks. In the winter, if we consider an interior comfort temperature of 20°C, the losses through the glazing require a smaller flow of water through the façade's glazing than if it was summer. If the water temperature is above the comfort temperature, the glazed envelope becomes a heat radiator towards the building's interior. Regarding energy saving, the installation of these windows in the façade's holes, combined with a free energy production system, entails between a 40 and a 70% reduction in energy consumption associated to heating or cooling the building.

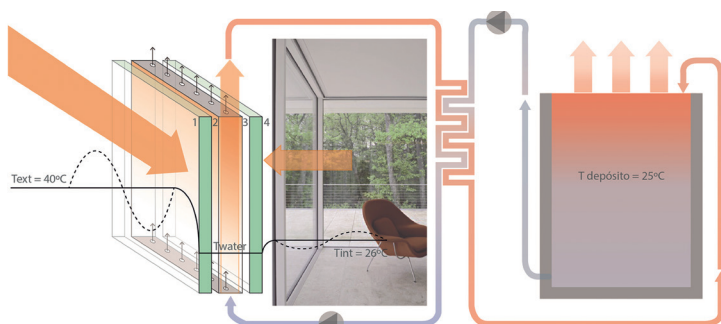
This is an emerging technology, and built examples out of laboratories and incorporated to buildings have started to appear since 2011. With such short time in the market, its construction process has not yet been industrialized, hence making its installation quite expensive. Alongside, there are other restrictions in terms of window size, due to the hydrostatic pressure.

que se cede en el intercambiador de placas se puede disipar en un depósito enterrado con el suficiente volumen para que la temperatura no aumente más de 5°C durante las horas de sol. Durante la noche debe funcionar un dispositivo que disipe en calor y baje la temperatura del depósito.

DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DE VIDRIOS ACTIVOS. El sistema de climatización mediante vidrios activos consta de dos circuitos, uno primario y otro secundario, como se describe en el esquema de principio de una instalación. (Fig. 2) El circuito primario comprende una bomba de circulación y un sistema para calentar o enfriar agua. El secundario consta de un circulador que distribuye el agua a las unidades terminales: los vidrios interiores o de fachada. Los fluidos de los dos circuitos no se mezclan. La transferencia de energía se realiza a través de un intercambiador de calor de placas. La misión del circuito primario consiste en proporcionar la energía necesaria, ya sea de calefacción o enfriamiento, al fluido que circula por los vidrios. La fuente de energía del circuito primario debe proporcionar agua a la temperatura deseada con el mínimo gasto energético posible. Para ello se recomienda utilizar colectores solares para calentar agua en invierno y depósitos de agua para disipar calor en verano.

El sistema del primario puede estar dotado de un depósito de inercia que hace las veces de estabilizador térmico. Muchos días a lo largo del año la

Fig. 2. Esquema de principio de una instalación de vidrios activos en fachada.



Nowadays, in search of multiplying its possibilities, the combination of different types of glass between its layers is being studied. (6)

The first drawing (Fig. 1) shows the performance of an active water-flow triple-pane glazing facing the exterior, in both summer and winter conditions. In the summer, the heat from solar radiation is absorbed by the water chamber. If the temperature in the chamber is below the temperature of the interior, the interior load due to people and machinery can be eliminated. In the winter, the air chamber minimizes the energy losses towards the exterior, and if the water's temperature is above the interior temperature, the façade can act as a transparent radiator.

When active glazing is placed on a façade exposed to sunlight, the radiation is transformed into heat energy, which increases the temperature of the water. The forced circulation of the water transports the absorbed heat to the heat exchanger. This element is in charge of cooling the water before it returns to the chamber. For levels of solar radiation between 500-1,000 W/m², a water flow in the chamber between 0,05-0,1 kg/(sm²) is enough to transport all the heat absorbed by the water and ensure temperature variations in the chamber under 5°C. In such way, an isotherm chamber is obtained, which blocks the trespassing of infrared radiation. In the absence of exterior solar radiation, the water is circulated through the chamber at a specific temperature, controlled by the temperature of the heat exchanger. The heat transferred in the plate heat exchanger can be dissipated in an underground tank with enough volume for the temperature not to increase more than 5°C during the hours of sunlight. During the night, a device that dissipates the heat and reduces the temperature of the tank should operate.

temperatura media está próxima a la de confort. Utilizando un depósito de agua con una gran inercia térmica, el agua del primario puede mantenerse muy estable y próxima a la temperatura media diaria. Así, una estrategia consiste en hacer recircular el agua del primario a través del depósito de inercia para mantener estable la temperatura del agua de las ventanas.

Simulación. Para estudiar el comportamiento de los vidrios activos en relación con su inercia térmica variable se realiza una simulación con software de la empresa IntelliGlass SL Este software ha sido validado por investigadores de la Escuela de aeronáuticos de Madrid, comparando los resultados obtenidos con el *software* Energy +. (11) Para llevar a cabo la evaluación de la demanda energética de un edificio se debe hacer una modelización de la edificación y posteriormente una simulación. Se considera que la edificación está caracterizada, desde el punto de vista energético, por los siguientes elementos:

- Cargas térmicas internas originadas por las personas, iluminación y máquinas
- Temperatura interior
- Inercia térmica interior por unidad de superficie, asociada a la masa y al calor específico de cerramientos, forjados y muebles
- Coeficiente de absorción de la radiación solar que entra en el interior de la edificación. Este valor es un coeficiente medio asociado a los diferentes materiales y colores de las superficies interiores
- Superficie en planta. Generalmente las cargas de iluminación o los valores de la inercia térmica se dan por unidad de superficie en planta. Por tanto, para determinar los valores globales de inercia térmica interior o carga térmica interior, necesitamos conocer la superficie en planta total
- El enfriamiento nocturno asociado a la ventilación natural o forzada, que permite refrigerar de forma gratuita los espacios interiores. Este intercambio de calor es proporcional al caudal de renovación, a la diferencia de temperaturas interior y exterior y a un coeficiente local de convección.

Para evaluar el comportamiento de los vidrios activos se realiza la simulación de dos casos sencillos:

DESCRIPTION OF THE ACTIVE GLAZING INSTALLATION. The climate-control system by active water-flow glazing consists of two circuits, a primary and a secondary one, as the schematic diagram of an installation describes. (Fig. 2) The primary circuit includes a circulating pump and a system to heat or cool water. The secondary circuit consists of a circulator that distributes the water to the terminal units: the interior or façade's glazing. The fluids in the two circuits do not mix. The energy transfer is done through a plate heat exchanger. The primary circuit's mission is to provide the necessary energy, either for heating or for cooling, to the fluid that circulates through the glazing. The energy source of the primary circuit must supply water at the desired temperature with the least energy consumption possible. For this, solar collectors are recommended in order to heat the water in the winter, and water tanks to dissipate the heat in the summer.

The primary system can be equipped with a buffer tank that acts as a thermal stabilizer. Many days throughout the year, the average temperature is close to comfort. Using a water tank with great thermal inertia, the primary system's water can remain quite stable and close to the average daily temperature. This way, a strategy would consist of making the primary system's water recirculate through the buffer tank to keep the water in the windows at a stable temperature.

Simulation. To study the performance of active glazing in relation to its variable thermal inertia, a simulation is carried out with software from the company IntelliGlass SL This software has been validated by researchers of the School of Aeronautical Engineering of Madrid, by comparing the results to those obtained with Energy+ software. (11) To carry out the

Caso 1: Se trata de una fachada sur de un edificio ubicado en Madrid. Es un ejemplo sencillo con vidrio activo conectado a un depósito de inercia a través de un intercambiador de calor de placas. Se realiza la simulación con dos volúmenes distintos de depósito. (Fig. 3)

Caso 2: Se trata de un edificio ubicado en Madrid que dispone una fachada sur de vidrio activo. Para disipar el exceso de energía se utiliza un depósito de inercia, como en el caso anterior. La diferencia consiste en el uso de un aerotermo para aumentar la disipación de energía durante la noche. (Fig. 4)

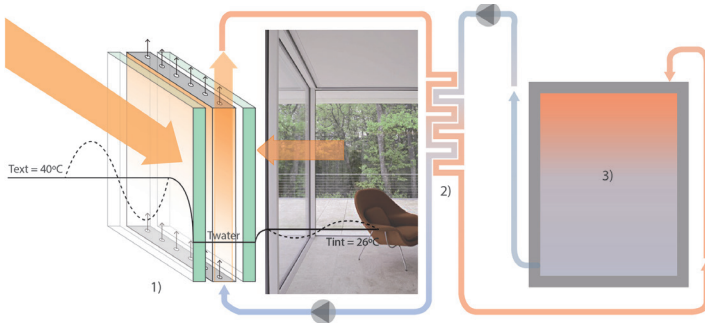


Fig. 3. Esquema de principio del Caso 1
1) Vidrio activo; 2) Intercambiador de calor;
3) Depósito de inercia.

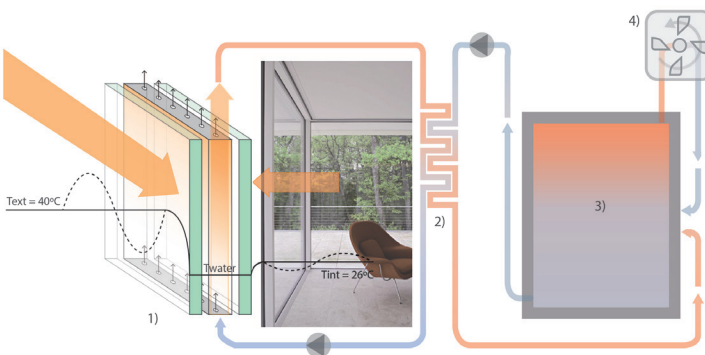


Fig. 4. Esquema de principio del Caso 2
1) Vidrio activo; 2) Intercambiador de calor;
3) Depósito de inercia; 4) Aerotermo.

evaluation of the energy demand of a building, a model of the building must be made, and later simulated. The building is considered to be characterized, from an energy point of view, by the following elements:

- Interior thermal loads originated by people, lighting and machinery
- Interior temperature
- Interior thermal inertia per surface unit, associated to the mass and specific heat of enclosing materials, slabs and furniture.
- Coefficient for the absorption of solar radiation that enters the building. This value is an average coefficient associated to the different materials and colors of the interior surfaces
- Floorplan surface. Generally the lighting loads or the thermal inertia values are given per floorplan surface unit. Therefore, to determine the global values of the interior thermal inertia or interior thermal load, we need to know the total surface of the floorplan.
- The cooling during the night is associated to the natural or forced ventilation, which allows an expense-free cooling of the interior spaces. This heat exchange is proportional to the renewal air flow, to the difference between interior and exterior temperature and to a local convection coefficient.

To evaluate the performance of the active glazing, a simulation is carried out for two simple cases:

Case 1: The south façade of a building located in Madrid. It is a simple example of active glazing connected to a buffer tank by means of a heat exchanger. The simulation is done for two different tank volumes. (Fig. 3)

Resultados:

GRÁFICOS DE TEMPERATURA

Caso 1: En estos primeros gráficos (Fig. 5) se puede observar cómo en invierno, con sol incidente sobre la fachada sur, la temperatura del vidrio sin cámara de agua puede alcanzar hasta los 50°C, con oscilaciones de temperatura de 45°C entre el día y la noche. Con el agua en circulación y el depósito de inercia se estabiliza la temperatura de las ventanas con oscilaciones de 15°C. A la vista de estos resultados se pueden plantear distintas estrategias de funcionamiento mediante la parada y la puesta en marcha de la circulación del agua.

En verano, la radiación incidente sobre la fachada sur es menor que en invierno, debido a que el ángulo de incidencia del sol es casi perpendicular a la horizontal. Aun así la temperatura se eleva muy por encima del confort y las oscilaciones son muy grandes. Con la circulación del agua y el depósito de inercia se consiguen oscilaciones no superiores a 10°C y se mantiene la temperatura por debajo de los 33°C.

El incremento de la inercia térmica mediante los acristalamientos activos con agua permite reducir entre 4 y 5 veces las oscilaciones térmicas de la fachada. La temperatura media del acristalamiento va ligada a la temperatura media del depósito.

Se puede apreciar que la inercia térmica debida al depósito reduce las variaciones de temperatura que se producen en una fachada de vidrio tradicional. También se observa que cuanto mayor es el volumen del depósito, menor es la oscilación de la temperatura a lo largo de un día. La inercia térmica del sistema es variable y, si la circulación de agua se para en días soleados de invierno, se puede aprovechar el calor del sol para calentar el interior del edificio.

Caso 2: El siguiente par de gráficos (Fig. 6) muestra la evolución de la temperatura de las ventanas en dos momentos diferentes del año, considerando que el depósito de inercia puede estar aislado o no. A la izquierda se puede

Case 2: This time the example consist on a building located in Madrid, with an active glazing on its south façade. To dissipate the excess of energy, a buffer tank is used as in the previous case. The difference is that a free-cooling device is used to increase the energy dissipation during the night. (Fig. 4)

Results

TEMPERATURE GRAPHS

Case 1: This first graphics (Fig. 5) shows how in the winter, with the Sun striking the south façade, the temperature of the glass with no water chamber can reach up to 50°C, with 45°C temperature oscillations between day and night. With the circulating water and the buffer tank, the window's temperature stabilizes with 15°C oscillations. In view of these results, different operational strategies can be proposed, by means of stopping and starting the water circulation.

In the summer, the radiation entering the south façade is less than in the winter, due to the Sun's angle of incidence being almost perpendicular to the horizontal line. Even so, the temperature rises way above the comfort range and the oscillations are very large. The water circulation and the buffer tank manage to keep the temperature below 33 °C, with oscillations under 10°C.

The increase in thermal inertia provided by the active water-flow glazing allows reducing between 4 and 5 times the thermal oscillations on the façade. The mean temperature of the glazing is linked to the mean temperature of the buffer tank.

observar la gráfica correspondiente a un día soleado de enero. Cuando el depósito no está aislado, la temperatura del agua que circula por la ventana puede bajar hasta los 10°C. Si el depósito está aislado, la temperatura de las ventanas no baja de 21°C durante la noche y puede llegar a subir a 30°C durante las horas centrales del día. Por lo tanto, se valida la opción de aislar el depósito para condiciones de invierno. Con el depósito aislado, se simulan las condiciones de verano.

A la derecha se puede observar la evolución de la temperatura de las ventanas en un día de julio. Con el depósito aislado, la temperatura de la ventana sube por encima de los 33°C. Si se pone a funcionar el aerotermo para aumentar la disipación, de las ventanas se mantiene entre valores que van de los 24°C a los 28°C, sin grandes oscilaciones y en rangos de confort.

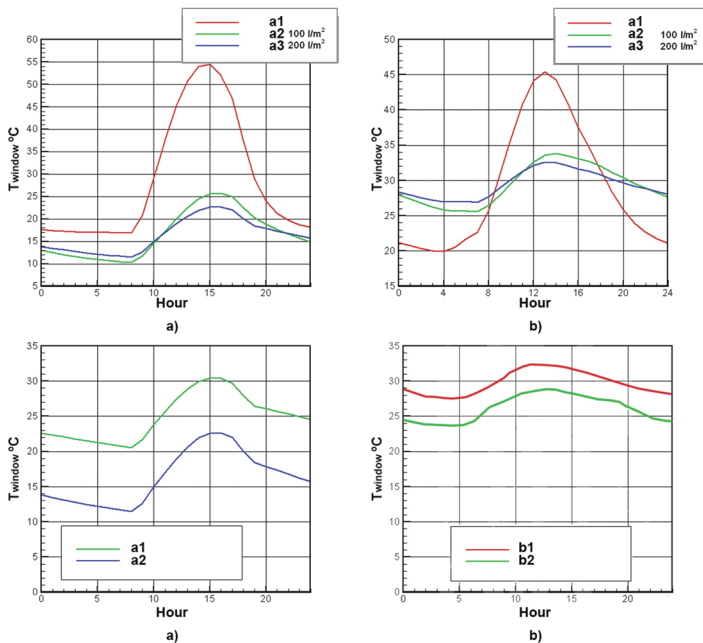


Fig. 5. Amortiguamiento térmico en fachada sur con diferentes volúmenes de depósito de inercia. a) 26 de enero; b) 15 de julio
a1: sin circulación de agua;
a2 y a3: circulación de agua + depósito con diferentes volúmenes.

Fig. 6. Temperatura de la ventana en verano e invierno.
a1: depósito aislado sin disipación;
a2: depósito sin aislar;
b1: depósito aislado;
b2: depósito aislado con disipación.

One can see that the thermal inertia due to the buffer tank reduces the temperature variations produced on a traditional glazed façade. One can also observe that, the larger the volume of the tank, the less the temperature oscillates throughout the day. The system's thermal inertia is variable, and if the water circulation it stopped on sunny winter days, the heat from the Sun can be used to heat the building's interior.

Case 2: The next pair of graphics (Fig. 6) shows the evolution of the windows' temperature in two different moments of the year, considering that the buffer tank may or may not be insulated. To the left, one can observe the graph for a sunny day in January. When the tank is not insulated, the temperature of the water flowing through the window can fall down to 10°C. If the tank is insulated, the temperature of the windows is never under 21°C during the night, and can rise up to 30°C in the early afternoon, during the hours of higher temperature.

To the right, one can observe the windows' temperature evolution on a day in July. With and insulated tank, the window's temperature rises over 33°C. If a free-cooling unit starts to work in order to increase the dissipation, the temperature of the windows is kept between 24°C and 28°C, with no large oscillations and in the comfort range.

The convenience of insulating the tank, both during the summer and during the winter, can be appreciated. The thermal inertia due to the tank reduces the temperature variations and the dissipation reduces the temperature of the tank in the summer.

Se puede apreciar que es conveniente aislar el depósito, tanto en verano como en invierno. La inercia térmica debida al depósito reduce las variaciones de temperatura y la disipación reduce la temperatura del depósito en verano.

El objetivo es mantener el depósito a una temperatura entre 20-25°C con el mínimo coste energético. Para ello, en invierno, se pretende capturar y almacenar la radiación solar que incide sobre el acristalamiento. En verano se debe disipar el exceso de energía. Considerando la inercia térmica del depósito se puede observar la evolución anual de la temperatura de las ventanas del caso 2. (Fig. 7)

AHORRO DE ENERGÍA. Atendiendo a los resultados que se muestran en la figura 5b y comparando las temperaturas de a1 (para ventana sin agua en circulación) y a3 (para ventana con agua en circulación y depósito de 200 l/m²) la tabla (Fig. 8) muestra la diferencia en consumo energético diario.

Se supone un interior a una temperatura de confort de 25°C, puesto que son condiciones de verano. La temperatura del agua (Tw) será la de la ventana sobre la que está incidiendo el Sol. Para evaluar la energía cedida por el vidrio al interior del edificio utilizamos el coeficiente de convección interior hc. La convección interna se refiere al flujo de calor que se da entre una zona, esto es, un volumen interior de aire, y las superficies que la delimitan. Así, el flujo de calor viene dado por la siguiente expresión:

$$Q_{\text{convección}} = h_c \times (T_{\text{superficie del vidrio}} - T_{\text{interior}})$$

El algoritmo de convección natural simple emplea coeficientes de convección h constantes para cada una de las diferentes configuraciones de transferencia de calor. (12) (13) Para una superficie de vidrio en condiciones interiores normales, se puede considerar un valor de 5 W/m² K.

Se desprecia asimismo el consumo energético producido por hacer circular el agua en a3, puesto que supondría 1 Wh/m².

The goal is to keep the tank at a temperature between 20-25 °C with the least energy cost possible. In order to do this, in the winter the intention is to capture and store the solar radiation that strikes the glazing. In the summer, the excess of energy must be dissipated. Considering the buffer tank's thermal inertia, it could be observed the annual evolution of the window's temperature for Case 2. (Fig. 7)

ENERGY SAVING. Based on the results shown in figure 5b and comparing the temperatures for a1 (glazing with non-circulating water) and a3 (glazing with circulating water and a 200 l/m² tank), Table 1 shows the difference in daily energy consumption.

The interior space is assumed to be at 25°C, since it is summer conditions. The water temperature (Tw) will be that of the window on which the Sun strikes. To evaluate the energy released by the glass towards the building's interior space, we use the inner convection coefficient hc. The inner convection refers to the heat flow between one area (an interior volume of air) and the surfaces that define it. This way, the heat flow is given by the following expression:

$$Q_{\text{convection}} = h_c \times (T_{\text{glass surface}} - T_{\text{interior}})$$

The algorithm for simple natural convection uses constant convection coefficients for each of the different heat-transfer configurations. (12) (13) For a glass surface in normal interior conditions, a value of 5 W/m² K can be considered. The energy consumed in the pumping system in a3 is disregarded, since it would amount to 1 Wh/m².

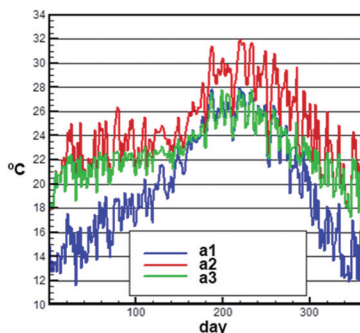


Fig. 7. Temperatura de la ventana a lo largo del año con diferentes estrategias utilizadas en el depósito de inercia.
a1: depósito sin aislar;
a2: depósito aislado;
a3: depósito aislado sin disipación.

Se comprueba el ahorro energético que supone la circulación del agua a través de la ventana; ésta disipa más del 50% de la carga, reduciendo el consumo diario a menos de la mitad que en la solución de agua sin circular.

		8-9:00	9-10:00	10-11:00	11-12:00	12-13:00	13-14:00	14-15:00	15-16:00	16-17:00	17-18:00	8-18:00
a1	Tw (°C)	32	37	41	44	45,5	44	41	37,5	35	31,5	
	Wh/m2	35	60	80	95	102,5	95	80	62,5	50	32,5	692,5
a3	Tw (°C)	29	30,5	31,5	32	32,5	33	32	31,75	31,5	31	
	Wh/m2	20	27,5	32,5	35	37,5	40	35	33,75	32,5	30	323,75
energy saved (Wh/m2)												368,75

Conclusiones. Los vidrios activos se están introduciendo en el mercado de la construcción como un medio eficaz para solucionar problemas energéticos asociados a grandes superficies acristaladas. El sistema de vidrios activos con cámara de agua en circulación evita el efecto invernadero impidiendo que la radiación solar penetre en el interior. Aunque todavía poco extendida, esta tecnología proporciona un aumento de la inercia térmica del muro, reduciendo así las variaciones térmicas internas. Este vidrio activo atenúa el exceso de radiación solar que atraviesa un vidrio convencional. Esto, unido a la mayor inercia térmica, aumenta el ahorro de energía en calefacción y refrigeración, así como el confort de los usuarios del edificio.

Fig. 8. Tabla comparativa entre el consumo energético con fachada sur de vidrios con agua sin circular (a1) y con agua en circulación (a3), para el caso 1 en condiciones de verano (ver figura 5b).

En este trabajo se ha simulado energéticamente una edificación con vidrio activo con cámara de agua en su fachada sur y con un depósito de agua enterrado para controlar la inercia del edificio. Se ha modelado mediante un sistema de ecuaciones de evolución de las temperaturas de todos los elementos que intervienen en el sistema. Mediante una simulación energética durante un año, se muestra que la mayor parte de los días la edificación se climatiza con el calor acumulado en los depósitos de inercia, sin gasto energético alguno. Para los meses más calurosos, un aerotermo es suficiente para disipar la energía interior y alcanzar la temperatura de confort, no siendo necesario ningún dispositivo adicional de climatización.

This proves the energy savings that the circulation of water through the window entails; it dissipates more than 50% of the load, hence reducing the daily consumption to less than half, compared to the solution with non-circulating water.

Conclusions. Active glazing is being introduced in the construction market as an effective means to solve the energy problems associated to large glazed surfaces. The active water-flow glazing system avoids the greenhouse effect by blocking the solar radiation that would penetrate to the interior. Though not yet widespread, this technology provides an increase in the thermal inertia of the wall, hence reducing the interior thermal variations. The active water-flow glazing dampens the excess of solar radiation that passes through a conventional glass. This fact, together with a higher thermal inertia, increases the energy savings in heating and cooling, as well as increasing the comfort for the building's users.

In this paper, an energy simulation has been carried out for a building with active water-flow glazing on its south façade and an underground buffer tank to control the building's inertia. It has been modelled by means of a set of temperature-evolution equations for all the elements that take part in the system. Through a year-long energy simulation, it is shown that most days the building is climate-controlled by the heat accumulated in the buffer tanks and, therefore, with no energy expense whatsoever. During the warmest months, a free-cooling device is enough to dissipate the interior energy and reach a comfort temperature, not needing any additional cooling device.

NOTAS

1. HERMANN, M.; DEL AMA, F.; HERNÁNDEZ, J. A. 'Analytical solution to the one-dimensional non-uniform absorption of solar radiation in uncoated and coated single glass panes'. *Energy and Buildings*, n. 47. 2012. 561-571 pp.
2. FANG, Y.; EAMES, P. C.; NORTON, B. 'Effect of glass thickness on the thermal performance of evacuated glazing'. *Solar Energy*, n. 81. 2007. 395-404 pp.
3. K. A. R. Ismail. 'Non-gray radiative convective conductive modeling of a double glass window with a cavity filled with a mixture of absorbing gases'. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, n. 47. 2006. 2972-2983 pp.
4. BAETENS, R.; JELLE, B.P.; GUSTAVSEN, A. 'Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: a state-of-the-art review'. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, n. 94. 2010. 87-105 pp.
5. CHOW, T.; LI, C.; LIN, Z. 'The function of solar absorbing window as water-heating device'. *Building and Environment*, n. 46. 2011. 955-960 pp.
6. CHOW, T.; LI, C.; LIN, Z. 'Innovative solar windows for cooling-demand climate'. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, n. 94. 2010. 212-220 pp.
7. GIL-LÓPEZ, T.; GIMÉNEZ-MOLINA, C. 'Environmental, economic and energy analysis of double glazing with a circulating water chamber in residential buildings'. *Applied Energy*, n. 101. 2013. 572-581 pp.
8. Patente Intelliglass SL 'Cerramientos transparentes o translúcidos activos con capacidad de gestión energética' ES 2304871 (España, 2010); EPO EP2123856 (Europa), 'Active transparent or translucent enclosures with energy control capacity' US8341894B2 (United States, 2013).
9. NUGENT, S.; PACKARD, A.; BRABON, E.; VIERRA, S. 'Living, Regenerative and Adaptive buildings'. *Whole Building Design Guide*. Steven Winter Associates Inc., 2011.
10. CHOW, T.; LI, C.; LIN, Z. 'Thermal characteristics of water-flow double-pane window'. *International Journal of Thermal Sciences*, n. 50. 2011. 140-148 pp.
11. DEL AMA, F.; ALONSO, A.; HERNÁNDEZ, J. A.; 'Active Glass with circulating water chamber for energy management in buildings'. *Proceedings of 4th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management*, 2011. 190-195 pp.
12. WALTON, G. N. *Thermal Analysis Research Program Reference Manual*, NBSSIR 83 2655. National Bureau of Standards, 1983.
13. ASHRAE, 1989 *ASHRAE Handbook - Fundamentals*, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1989.

NOTES

1. HERMANN, M.; DEL AMA, F.; HERNÁNDEZ, J. A. 'Analytical solution to the one-dimensional non-uniform absorption of solar radiation in uncoated and coated single glass panes'. *Energy and Buildings*, n. 47. 2012. 561-571 pp.
2. FANG, Y.; EAMES, P. C.; NORTON, B. 'Effect of glass thickness on the thermal performance of evacuated glazing'. *Solar Energy*, n. 81. 2007. 395-404 pp.
3. K. A. R. Ismail. 'Non-gray radiative convective conductive modeling of a double glass window with a cavity filled with a mixture of absorbing gases'. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, n. 47. 2006. 2972-2983 pp.
4. BAETENS, R.; JELLE, B.P.; GUSTAVSEN, A. 'Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: a state-of-the-art review'. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, n. 94. 2010. 87-105 pp.
5. CHOW, T.; LI, C.; LIN, Z. 'The function of solar absorbing window as water-heating device'. *Building and Environment*, n. 46. 2011. 955-960 pp.
6. CHOW, T.; LI, C.; LIN, Z. 'Innovative solar windows for cooling-demand climate'. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, n. 94. 2010. 212-220 pp.
7. GIL-LÓPEZ, T.; GIMÉNEZ-MOLINA, C. 'Environmental, economic and energy analysis of double glazing with a circulating water chamber in residential buildings'. *Applied Energy*, n. 101. 2013. 572-581 pp.
8. Intelliglass SL patent 'Cerramientos transparentes o translúcidos activos con capacidad de gestión energética' ES2304871 (Spain, 2010); 'Active transparent or translucent enclosures with energy control capacity' US8341894B2 (United States, 2013).
9. NUGENT, S.; PACKARD, A.; BRABON, E.; VIERRA, S. 'Living, Regenerative and Adaptive buildings'. *Whole Building Design Guide*. Steven Winter Associates Inc., 2011.
10. CHOW, T.; LI, C.; LIN, Z. 'Thermal characteristics of water-flow double-pane window'. *International Journal of Thermal Sciences*, n. 50. 2011. 140-148 pp.
11. DEL AMA, F.; ALONSO, A.; HERNÁNDEZ, J. A.; 'Active Glass with circulating water chamber for energy management in buildings'. *Proceedings of 4th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management*, 2011. 190-195 pp.
12. WALTON, G. N. *Thermal Analysis Research Program Reference Manual*, NBSSIR 83 2655. National Bureau of Standards, 1983.
12. ASHRAE, 1989 *ASHRAE Handbook - Fundamentals*, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1989.