

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

**Alternativas para la mejora de la eficiencia  
energética de los acristalamientos: los vidrios  
dinámicos**

**TESIS DOCTORAL**

Autora

M<sup>a</sup> del Carmen Giménez Molina

Arquitecto

2011



Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

**Alternativas para la mejora de la eficiencia  
energética de los acristalamientos: los vidrios  
dinámicos**

Autora

M<sup>a</sup> del Carmen Giménez Molina

Arquitecto

Director

Benito Lauret Aguirregabiria

Doctor Arquitecto

2011



Tribunal nombrado por el Magnífico y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día.....de.....de 2011.

Presidente: \_\_\_\_\_

Secretario: \_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Suplente: \_\_\_\_\_

Suplente: \_\_\_\_\_

Realizando el acto de defensa y lectura de tesis

el día .....de.....de 2011 en la E.T.S. Arquitectura.

El presidente

Los vocales



Para Rodrigo  
por su constante apoyo y ayuda.

Para mis padres,  
por su constante aliento para continuar.

Para mi tío, mi punto de referencia.





## INDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>VII</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ESTADO DE LA TÉCNICA Y DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>7</b>
2.1. ANTECEDENTES.....	7
2.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS CERRAMIENTOS ACRISTALADOS .....	16
2.3. CASAS ENERGÍA-CERO. COMPETICIÓN E INVESTIGACIÓN: EL CONCURSO SOLAR DECATHLON. ....	33
2.4. EL VIDRIO EN LA EDIFICACIÓN. MEJORAS EN SU EFICIENCIA: DOBLE PIEL, VIDRIOS ESTÁTICOS Y DINÁMICOS. ....	48
2.5. CONCLUSIONES PARCIALES .....	105
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>109</b>
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	109
3.2. JUSTIFICACIÓN .....	110
3.3. OBJETIVOS CONCRETOS O PARTICULARES.....	111
3.4. HIPÓTESIS DE PARTIDA .....	114
<b>4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>119</b>
4.1. SELECCIÓN DE VIDRIOS.....	119
4.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ENERGÉTICO .....	121
4.3. PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y DE SIMULACIÓN .....	123
4.4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL VIDRIO CON CÁMARA DE AGUA. ....	124
<b>5. METODOLOGÍA DOCUMENTAL.....</b>	<b>131</b>
5.1. SELECCIÓN DE LOS TIPOS DE VIDRIOS .....	132
5.2. PROGRAMAS DE SIMULACIÓN DISPONIBLES .....	133

5.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DE REFERENCIA .....	134
5.4. CONCLUSIONES PARCIALES .....	134
<b>6. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>139</b>
6.1. RESUMEN .....	139
6.2. SELECCIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN .....	140
6.3. DEFINICIONES .....	141
6.4. INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN .....	145
6.5. EJEMPLOS DE APLICACIÓN EN EDIFICIOS REALES .....	152
6.6. CARACTERIZACIÓN Y MODELIZACIÓN DE LOS ENSAYOS FÍSICOS. ....	174
6.7. SIMULACIONES .....	190
6.8. CONCLUSIONES PARCIALES .....	207
<b>7. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL: ENSAYOS FÍSICOS .....</b>	<b>211</b>
7.1. ANTECEDENTES DE MÉTODOS DE ENSAYO EN CONDICIONES DE INTERIOR Y DE EXTERIOR. ....	211
7.2. MÉTODO DE ENSAYO .....	216
7.3. CONDICIONANTES DEL ENSAYO. ....	224
7.4. MODIFICACIONES DEL ENSAYO. ....	228
7.5. ENSAYOS ESPECIALES PARA VIDRIOS CON AGUA .....	234
7.6. CICLO DE ENSAYOS .....	251
7.7. CONCLUSIONES PARCIALES:.....	291
<b>8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>295</b>
8.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DE SIMULACIÓN. ....	295
8.2. ESTIMACIÓN DE LAS MEJORAS ENERGÉTICAS APORTADAS POR EL VIDRIO CON AGUA CIRCULANTE EN LA CÁMARA. ....	332
8.3. CONCLUSIONES PARCIALES .....	339
<b>9. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>343</b>
9.1. CONCLUSIONES GENERALES .....	343
9.2. CONCLUSIONES PARTICULARES .....	343
9.3. PROYECCIÓN DE NUEVOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN: .....	348

<b>CONCLUSIONI E FUTURE LINEE DI RICHERCA .....</b>	<b>349</b>
CONCLUSIONI GENERALI .....	349
CONCLUSIONI PARTICOLARI .....	349
PROGETTAZIONE DI NUOVI LAVORI DI RICERCA. ....	354
<b>10. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>357</b>
10.1. REFERENCIAS .....	357
10.2. BIBLIOGRAFÍA .....	360



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero hacer constar mi enorme gratitud hacia Benito Lauret Aguirregabiria, quien no solo me ha enseñado a investigar, sino que gracias a él he podido dar mis primeros pasos en la universidad.

Quiero agradecer a la profesora M<sup>a</sup> Caterina Redini y Luciano Cupelloni por su acogida en la Università la Sapienza di Roma, lugar en el que se me recibió como a una auténtica "*professora*", dándome incluso la posibilidad de incorporarme a la docencia, junto a las inolvidables clases del Laboratorio de Costruzione junto a Antonella Valitutti. Hago extensivo este agradecimiento a todos los miembros del Departamento ITACA.

Muy especialmente quiero agradecer a los fabricantes nacionales que han dado sus vidrios por su atenta colaboración y disponibilidad para el suministro de las muestras experimentales.

A mis compañeros del departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la Universidad Politécnica de Madrid, por su constante aliento y por las correcciones y comentarios que continuamente me han dado para la mejora de este trabajo.

A mis compañeros del Departamento de Física e Instalaciones aplicada a la Edificación, al Medio Ambiente y al Urbanismo, mayormente a César Díaz Sanchidrian, por su confianza en mí.

A toda la comunidad de la ETS. Arquitectura de Madrid en la que me siento plenamente integrado gracias a ella.

A Rodrigo, que ha sabido llevar con paciencia todo el tiempo que me ha llevado la realización de esta tesis, y por su inestimable ayuda en todo momento.

A mis padres y mi tío Paco, a quien le debo todo, y que sin su insuperable confianza esta tesis hubiera sido imposible.

A mi abuela Matilde, a quien estoy segura le hubiera enorgullecido este trabajo.

Muchas gracias a todos.



## RESUMEN

Durante las últimas décadas el vidrio se ha convertido en un material de construcción indispensable, dadas sus excelentes características y propiedades. Además la envolvente acristalada juega un papel vital en el intercambio de energía del edificio, siendo un elemento de expresión arquitectónica fundamental como se ha demostrado a lo largo de los siglos XIX y XX.

Durante el pasado siglo, hemos sido testigos de una gran evolución, tanto en el desarrollo de la fabricación del vidrio que ha permitido la creación de nuevos tipos, como de la gran evolución constructiva, que ha originado el aumento de las superficies acristaladas, con respecto a la superficie total del cerramiento, trayendo consigo una baja significativa de los costes de producción de los acristalamientos y por tanto de comercialización.

La utilización de grandes superficies acristaladas es una práctica arquitectónica cada vez más frecuente. Pero hoy día, el acristalamiento usado convencionalmente en viviendas no alcanza la eficiencia energética deseable en una casa de máximo ahorro energético. La justificación de la presente investigación está, por tanto, en intentar mejorar este comportamiento y reducir el consumo energético en edificios, más concretamente en viviendas. Se trata de acercarnos lo más posible a un edificio con una mayor eficiencia térmica, un ahorro de energía y una contribución a la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Sin embargo, aún cuando la transparencia es una de sus propiedades más importantes, que impulsa al arquitecto a la utilización de grandes superficies acristaladas para conseguir el efecto de la fluidez espacial y de las vistas, puede a veces, llegar a convertirse en un gran inconveniente, debido por un lado, al efecto invernadero, al permitir el paso de una gran cantidad de calor, y por otro, las grandes pérdidas térmicas que ocasiona, debido a su alto coeficiente de transmisión. Es por ello por lo que se plantea la necesidad de la investigación sobre nuevos tipos de vidrios. Entre los posibles candidatos a la contribución a la mejora en su comportamiento frente a las cargas térmicas, y por tanto en eficiencia energética, están los vidrios actualmente conocidos como bajo emisivos y de control solar. Sin embargo, tanto unos como otros, tienen un comportamiento óptimo frente a condiciones concretas de invierno o de verano, resultando desfavorables en otras. Debido a ello se plantea el estudio de vidrios capaces de cambiar sus propiedades según ciertas condiciones, que llamaremos vidrios dinámicos. Este nuevo campo, aún en proceso de investigación y de comercialización, aporta dos tipos de vidrio capaces de responder favorablemente a las demandas de mejora energética, los denominados vidrios electrocrómicos y vidrios con fluido circulante en su cámara.

Estos nuevos tipos de vidrio, pueden ayudar a controlar el efecto de las cargas térmicas, tanto en las pérdidas como en ganancias, los dos puntos débiles del vidrio convencional. Ante ello se propone una investigación ante estos nuevos productos frente a unas exigencias crecientes, en lo referente a la eficiencia energética en viviendas, ahora en alza desde la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación.

La investigación se desarrolla en cinco fases:

En una primera fase, se expone el estado de la técnica y de la investigación, analizando tanto los antecedentes de la eficiencia energética en edificios y el problema energético en la edificación, estudiando aquellas experiencias que aportan datos de interés sobre este tema. Entre ellas destacan tanto las reflejadas en artículos técnicos como las que se inscriben en el marco del concurso Solar Decathlon. Por último, en esta primera fase, estudiamos los vidrios existentes a fin de analizar diversas técnicas de mejora en la eficiencia energética, realizando una descripción fundamentada en un análisis pormenorizado de las distintas estrategias conocidas que podrían mejorar la eficiencia energética de los acristalamientos convencionales. Estos tres nuevos tipos que se van a estudiar son:

- Fachadas de doble piel, que permiten con más o menos restricciones una circulación de aire que optimiza el comportamiento.
- Vidrios con adición de delgadas capas dinámicas; los llamados vidrios cromogénicos capaces de cambiar su color o transparencia.
- Vidrios con cámara con fluidos circulantes, en el que la reducción de cargas térmicas se obtiene gracias a la circulación de un fluido por su cámara, ya que algunos de ellos son capaces de absorber parte de la radiación infrarroja incidente.

En una segunda parte, se concretan los objetivos específicos de las siguientes fases, a la luz del estado de la técnica y de la investigación realizada. En esta fase se caracteriza el comportamiento de los vidrios tanto a pérdidas como en ganancias, determinando aquellos vidrios con mejores características para su posterior estudio experimental, analizado en las siguientes fases.

En una tercera fase se desarrolla una metodología de simulación, mediante la aplicación de programas de simulación energética por ordenador, con el fin de comprobar las transmisiones térmicas que se producen a través de los diferentes tipos de vidrio a estudiar.

En una cuarta fase se desarrolla una metodología experimental, mediante la creación de un nuevo método de ensayo, capaz de medir el comportamiento térmico de determinados vidrios elegidos, tanto a pérdidas como en ganancias, exponiendo los resultados obtenidos.

En una quinta fase se desarrolla la discusión de resultados, mediante la comparación de resultados obtenidos mediante las metodologías de simulación y experimental.

En una sexta fase se exponen las conclusiones obtenidas de todo el estudio precedente, discriminando entre las conclusiones generales de la tesis, y aquellas particulares, distinguiendo entre conclusiones medioambientales, proyectuales, metodológicas, experimentales, científicas, tecnológicas, industriales y normativas. Esta fase finaliza con la proyección de nuevos trabajos, definiendo aquellas posibles líneas de investigación derivadas del presente estudio, algunas de ellas ya en marcha.



## SUMMARY

During the last decade, glass has become an indispensable construction material, due to its excellent properties and characteristics. Furthermore the glass encasing plays an important role in the interchange of energy in the building, and a proven fundamental element of architectural expression throughout the 19th and 20th century.

During the past century we have witnessed a great evolution, as much as in the manufacturing developments of glazing that has led to creation of new types, as to the evolution in construction that has set off increases in the utilization of glass surfaces in relation to the total enclosure surface area; therefore leading to a significant reduction of the production cost of glazing and its commercialization.

The utilization of large amounts of glass surface areas is an architectural practice that is becoming more common place. However, today, the glazing traditionally used in residences does not reach the desired energy efficiency in a residence for maximum energy savings. The driving force of this research is improving this behaviour and reduces the energy consumption of buildings and in particular family residences. The concept is to get closer to the ideal energy efficient building and thus contribute to a reduction of CO<sub>2</sub>.

However, although transparency is one of its most important points, which impels the architect the use of glazing for large surfaces to obtain the effect of spatial fluidity and sights, it can be of a great inconvenient; due to on one hand: the greenhouse effect which allows heat to pass through – on the other hand, the enormous thermal loss that is produced due to its high transmission coefficient. For this reason it is suggested to engage in further investigations of new types of glazing. Among the possible candidates for a contribution in the improvement of the behavior of glazing in face of thermal loads, and therefore energy efficiency, there are currently glazing known as "low emissions" and "solar control". However, these as others, have an optimal behavior in specific conditions in winter or summer – but unfavorable in others. Due to this, it is suggested the study of glazing capable of changing its properties according to certain conditions, named dynamic glazing. This new field is in the process of research and commercialization and contributes two types of glazing capable of favorably responding to the demands of energetic improvement; known Electrochromic Glazing and others as glazing with water flow in their chamber.

These new types of glazing have the potential to help control the loads of the thermal effect, insomuch as the gains or losses – both weak points in conventional glazing. Therefore it is suggested for research to be conducted on these new products /technologies in manifest of the increase necessities of energy efficiency of residences; which is in greater demand due to the coming into effect the "Código Técnico de la Edificación" (the new building code)

The research is to be divided in five phases.

In a first phase, describes the state of the art and research, analyzing the history of energy efficiency in buildings and the energy problem in the building, studying the experiences that provide interesting data on this topic. These include both technical

and reflected in items which form part of the Solar Decathlon. Finally, in this first phase, we study the existing glass to discuss various techniques for improving energy efficiency, carrying out a description based on a detailed analysis of the various known strategies that could improve the energy efficiency of conventional glazing. These three new types to be studied are:

- Double skinned facade, which allow greater or less restrictions in the air circulation which optimizes the behavior.
- Glass/windows with dynamic layers, such as Electrochromic Glazing which are capable of changing their color or transparency.
- Fluid flow glazing, where the thermal loads reduction is achieved by the flow of a fluid in its chamber, due to some of them are capable of absorbing part of the infrared radiation incident.

In the second part, concrete objectives are to be specified of the subsequent phases, in view of the technology and of the current research. In this phase, the behavior of the glazing is classified in thermal losses as in gains - establishing the glazing with the best behavior for further research which are analyzed in the following phases.

The third phase consists of the development of a simulation method, by means of applying energy simulation software with the objective of verifying thermal transmissions that are produced through various types of glazing.

In the fourth phase consists of developing an experimental method, by means of establishing a new testing method, capable of measuring the thermal behavior in specifically chosen glazing, insomuch as losses as in gains, exhibiting the obtained results.

In the fifth phase consists of developing a dialogue of the results, by means of comparing the obtained results through the methodology of simulation and experimental.

In the sixth phase is presenting the conclusions obtained from the precedent study, discriminating among the general conclusions of the thesis, y those particulars - distinguishing among Environmental conclusions, planning methodology, methodology, experimental, scientific, technological, industrial and regulation. The phase finalizes with the planning of new jobs, defining those possible lines of research that derive from the present study, some of which are already in place.

## ABSTRACT

Durante l'ultimo decennio il vetro è diventato un materiale da costruzione indispensabile date le sue eccellenti caratteristiche e proprietà. Inoltre, l'involucro di vetro gioca un ruolo vitale nel bilancio energetico dell'edificio, ed è un elemento fondamentale di espressione architettonica, come si è dimostrato lungo i secoli XIX e XX.

Durante il secolo scorso, abbiamo assistito ad una grande evoluzione, sia nello sviluppo della produzione del vetro, che ha permesso la creazione di nuove tipologie, che dell'evoluzione compositiva, la quale ha originato l'aumento delle superficie vetrate rispetto la superficie totale dell'involucro, a cui è seguita una riduzione significativa dei costi di produzione e quindi di commercializzazione.

L'uso di ampie superfici vetrate è una pratica architettonica sempre più frequente. Ma oggi, il vetro, convenzionalmente utilizzato negli edifici, non raggiunge l'efficienza energetica auspicabile in un'abitazione che può vantare il massimo risparmio energetico. La giustificazione della presente ricerca è quindi cercare di migliorare questo comportamento e ridurre il consumo energetico negli edifici. Si tratta di avvicinarsi più possibile ad un edificio con una maggiore efficienza energetica, un risparmio energetico e un contributo alla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>.

Tuttavia, pur essendo la trasparenza una delle proprietà più importanti, che incoraggia l'architetto per l'uso di grandi superfici vetrate, per ottenere l'effetto del flusso spaziale e viste più ampie può trasformarsi, però, in un grave inconveniente dovuto da un lato all'effetto serra, permettendo il passaggio di una grande quantità di calore, e dall'altro alle grandi perdite termiche che causa per il suo alto coefficiente di trasmissione. E' per questo motivo, che la ricerca su nuove tipologie di vetro è necessaria. Tra i possibili candidati per contribuire al miglioramento delle prestazioni come risposta a carichi termici, e quindi all'efficienza energetica, esistono oggi vetri noti come "vetri a controllo solare" e "basso-emissivi". Tuttavia anche se essi hanno un ottimo rendimento indipendentemente dalle condizioni specifiche in inverno o in estate, hanno in altri ambiti evidenti limitazioni. Questo accade perché la ricerca va verso la produzione di vetri capace di cambiare le loro proprietà in base a determinate condizioni, chiameremo questi vetri "vetri dinamici". Questo nuovo campo, ancora in processo di ricerca e di commercializzazione, fornisce due tipi di vetro in grado di rispondere positivamente alle richieste di miglioramento energetico, i vetri chiamati "elettrocromici" e i "vetri con fluido circolante" all'interno della camera.

Questi nuovi tipi di vetro, possono contribuire a controllare l'effetto dei carichi termici, siano nelle perdite che nei guadagni, i due punti deboli del vetro convenzionale. Alla luce di questa ricerca si propone uno studio di questi nuovi prodotti per affrontare una crescente domanda in termini di efficienza energetica negli edifici, ora in aumento dall'entrata in vigore del Codice tecnico dell'edilizia.

La ricerca si sviluppa in cinque fasi:

- In una prima fase, si descrive lo stato dell'arte e della ricerca, analizzando la storia della efficienza energetica negli edifici e il problema energetico nell'

edilizia, studiando quelle esperienze che forniscono dati interessanti su questo argomento. Comprendono sia tecniche trattate in articoli tecnici, sia quelli che fanno parte del Concorso Solar Decathlon. Infine, in questa prima fase, si studia il vetro esistente col fine di analizzare le diverse tecniche per migliorare l'efficienza energetica, facendo una descrizione basata su un'analisi dettagliata delle diverse strategie che potrebbero migliorare l'efficienza energetica dei vetri convenzionali. Queste tre nuove tipologie da studiare sono:

- facciate a doppia pelle, che permettono un flusso d'aria, con più o meno restrizioni, una circolazione d'aria che ottimizza il comportamento.
- Vetri con la addizione di sottili strati dinamici; il vetro cosiddetto cromogenico in grado di cambiare il proprio colore o la trasparenza.
- Vetri con fluidi circolanti all'interno della camera, nei quali la riduzione dei carichi termici si ottiene facendo circolare un fluido attraverso la sua camera, possono in grado di assorbire parte della radiazione infrarossa incidente.

In una seconda parte, si rendono concreti gli obiettivi specifici delle fasi successive, alla luce dello stato della tecnica e della ricerca fatta. In questa fase si caratterizza il comportamento dei vetri sia a perdite che a guadagni, identificando i vetri con le migliori caratteristiche per un ulteriore studio sperimentale, discusso nelle fasi successive.

In una terza fase si sviluppa una metodologia di simulazione mediante l'applicazione di programmi di simulazione energetica al computer, col fine di controllare le trasmissioni termiche che si manifestano attraverso i diversi tipi di vetri a studiare.

In una quarta fase, si sviluppa una metodologia sperimentale mediante la creazione di un nuovo metodo di "ensayo" in grado di misurare il comportamento termico di alcuni tipi di vetro selezionati sia a perdite che a guadagni, indicando i risultati ottenuti.

In una quinta fase si sviluppa la discussione dei risultati, mediante il confronto dei risultati ottenuti attraverso le metodologie sperimentali e di simulazione.

In una sesta fase si espongono le conclusioni ottenute in tutto lo studio precedente, distinguendo tra le conclusioni generali della tesi, e quelli particolari: le conclusioni ambientali, proiettive, metodologiche, sperimentali, scientifiche, tecnologiche, industriali e di regolamentazione. Questa fase finisce con la proiezione di nuovi lavori, definendo le possibili linee di ricerca derivanti da questo studio, alcune di loro già in corso.

## ÍNDICE CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
-----------------------------	----------



## 1. INTRODUCCIÓN

A raíz de la primera crisis energética mundial que tuvo lugar en el año 1973, debida esencialmente al encarecimiento del precio del petróleo, se toman las primeras medidas encaminadas a reducir los consumos energéticos de los edificios, mediante el uso de las normativas existentes y regulación energética de las técnicas constructivas.

Como respuesta a esta situación y como medio para dar una solución a todos estos problemas, se abren desde una perspectiva internacional grandes protocolos destinados tanto a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, como con la sostenibilidad del planeta.

Los dos principales están relacionados con la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Se trata de los protocolos de Kioto y de Bali, enmarcados dentro de la Convención del Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Los siguientes, se relacionan con la sostenibilidad, desarrollo de energías renovables y protección de los recursos de los que dispone nuestro planeta, así como su conservación. Se trata del protocolo de Montreal y del Programa 21 de la ONU.

Dando respuesta a estas actuaciones mundiales, la Unión Europea, a mediados de la década de 1980, comienza a exigir niveles de formación, estándares profesionales y códigos deontológicos para la prestación de servicios profesionales de arquitectura en Europa, desarrollando normativas tendentes a la integración de la eficiencia energética en los edificios.

La creación en 1999 de la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE), culminó con la aparición del CTE (Código Técnico de la Edificación), aprobado el 17 de Marzo de 2006, teniendo por objeto establecer las exigencias básicas de calidad así como los procedimientos para cumplirlas con suficientes garantías técnicas, que deben cumplir los edificios, para satisfacer, entre otros, los requisitos básicos de ahorro de energía y aislamiento térmico. La aprobación del Código Técnico de la Edificación supuso la superación y modernización del marco normativo de la edificación en España, que había establecido las anteriores Normas Básicas de la Edificación, creadas como disposiciones de obligado cumplimiento en el proyecto y la ejecución de los edificios. Y no solo la creación del CTE, sino la aprobación del Real Decreto 47/2007, creando el procedimiento básico para la calificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción. Se estima que la puesta en práctica de esta medida conducirá a un ahorro próximo al 20% respecto al consumo actual.

Si se estudia más concretamente el consumo energético en las edificaciones de viviendas residenciales, se puede ver que el mayor consumo se genera en climatización. Una parte importante de esta ineficiencia energética de los edificios se debe al acristalamiento. Los tipos de vidrio existentes en el mercado tienen que enfrentarse a situaciones climáticas cambiantes, lo que hace que los acristalamientos solo sean eficientes en una determinada época del año o en una situación en concreto.

Algunas líneas de trabajo se orientan a la reducción de las superficies acristaladas con el fin de minimizar sus efectos negativos. Sin embargo, la aspiración de la transparencia como valor arquitectónico se ha puesto de manifiesto a través de la

historia reciente mediante el testimonio de obras de los mejores arquitectos, reivindicando en todo momento la importancia de las vistas. Es por este motivo por el que se tiene un especial interés en la búsqueda de un acristalamiento más eficiente energéticamente hablando, dado que los actuales son ineficientes.

El vidrio, por tanto, tiene un comportamiento energético peculiar, que lo hace singular y único en su especie, que lo hace diferente de los materiales opacos de la envolvente. En consecuencia, esta tesis trata de estudiar los distintos tipos de vidrios, que siendo capaces de cambiar sus propiedades ópticas modificando su transparencia u opacidad, puedan reducir o aumentar la carga térmica de las edificaciones, como respuesta a una situación exterior cambiante, como posible mejora de la eficiencia energética.

Por tanto, la manera de conseguir mejora en la eficiencia energética de los acristalamientos sería por un lado el estudio de los vidrios bajos emisivos y de control solar, aplicados de un modo sencillo o con soluciones más complejas o sofisticadas, como son las fachadas de doble piel, a la que pueden incorporarse cualquier tipo de vidrio. Finalmente como la experiencia indica, que a pesar de todo, todavía habría que conseguir mejoras en las prestaciones de los cerramientos acristalados, no conseguidos con los anteriores, se estudia la posibilidad de obtener mejora con los denominados vidrios cromogénicos, capaces de cambiar su color o transparencia bien en función de las condiciones climáticas exteriores o por el propio usuario. Otro tipo de acristalamiento, que podemos incluir dentro del grupo de los vidrios dinámicos, son los vidrios con fluido circulante, capaces de controlar la radiación entrante mediante la circulación de un fluido caloportador, comportándose todo el conjunto como un intercambiador de calor entre el exterior y el interior, manteniendo en todo momento la transparencia.

En consecuencia, esta tesis trata de demostrar que se pueden conseguir mejoras en la eficiencia energética mediante la utilización de vidrios dinámicos. Para ello nos adentraremos primero en un estudio teórico, basado en el análisis de revistas científicas y tesis doctorales. Con el fin de confirmar aquellos vidrios, seleccionados mediante la metodología documental, capaces de ofrecer una mejora energética, se propone una metodología experimental mediante la ejecución y diseño de un nuevo método de ensayo físico capaz de estudiar el comportamiento térmico tanto a pérdidas como ganancias, de los vidrios elegidos, bajo condiciones reales. Como complemento a la metodología experimental propuesta, se analizarán diversas herramientas de simulación energética por ordenador, construyendo modelos tridimensionales con objeto de poder comparar los resultados obtenidos en la simulación con aquellos realizados experimentalmente y en segundo lugar extraer conclusiones sobre la fiabilidad de estos programas de simulación y su capacidad de reproducir situaciones reales. Esto es de gran importancia ya que el realizar simulaciones por ordenador es mucho más rentable en tiempo, esfuerzo y dinero, que realizar ensayos físicos. Todo ello con el objetivo de demostrar que existen vidrios dinámicos hoy día, que pueden superar en prestaciones al resto de los vidrios, siendo además capaces de controlar la carga térmica de las edificaciones y consiguiendo un cierto ahorro de energía que trataremos de definir.



## ÍNDICE CAPÍTULO 2. ESTADO DE LA TÉCNICA Y DE LA INVESTIGACIÓN

<b>2. ESTADO DE LA TÉCNICA Y DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>7</b>
2.1. ANTECEDENTES.....	7
2.1.1. Eficiencia energética en los edificios.....	7
2.1.2. Evolución hacia la eficiencia energética hasta nuestros días.....	7
2.1.3. Antecedentes y prototipos de viviendas eficientes.....	13
2.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS CERRAMIENTOS ACRISTALADOS .....	16
2.2.1. El uso de las superficies transparentes para el ahorro energético. ....	16
2.2.2. Captación, pérdidas, transparencia y ventilación.....	17
2.2.3. Evolución de la eficiencia energética del vidrio.....	20
2.2.4. Eficiencia energética del vidrio. Parámetros ópticos y energéticos del vidrio	25
2.3. CASAS ENERGÍA-CERO. COMPETICIÓN E INVESTIGACIÓN: EL CONCURSO SOLAR DECATHLON. ....	33
2.3.1. Descripción de la casa solar UPM-2007.....	37
2.3.2. Prestaciones del cerramiento acristalado de las casas Solar Decathlon 2007 .....	41
2.4. EL VIDRIO EN LA EDIFICACIÓN. MEJORAS EN SU EFICIENCIA: DOBLE PIEL, VIDRIOS ESTÁTICOS Y DINÁMICOS. ....	48
2.4.1. Fachadas de doble piel.....	49
2.4.2. Vidrios estáticos .....	52
2.4.2.1. Vidrio sencillo o doble con cámara de aire. Parámetros ópticos y térmicos del vidrio plano.....	52
2.4.2.2. Vidrios de control solar.....	54
2.4.2.3. Vidrio doble con capa metálica de baja emisividad. ....	54
2.4.2.4. Vidrios con Aerogel.....	56
2.4.2.5. Vidrios al vacío .....	57
2.4.2.6. Materiales semi-transparentes aislantes .....	57
2.4.2.7. Dispositivos de redireccionamiento de luz natural.....	57
2.4.3. Vidrios cromogénicos. Estado de la técnica. ....	58
2.4.3.1. Vidrios cromogénicos. Vidrios dinámicos pasivos.....	59

a) Fotocrómicos .....	59
b) Termocrómicos: .....	61
2.4.3.2. Vidrios cromogénicos. Vidrios dinámicos activos.....	63
a) Vidrios de cristal líquido disperso (LCD): .....	63
b) Gasocrómicos: .....	67
c) Vidrio de partículas en suspensión (SPD): .....	70
d) Vidrios electrocrómicos: .....	72
2.4.4. Vidrios cromogénicos. Estado de la investigación .....	79
2.4.5. Vidrios con cámara de agua.....	92
2.4.5.1. Estado de la técnica.....	93
2.4.5.2. Estado de la investigación.....	100
2.5. CONCLUSIONES PARCIALES .....	105

## 2. ESTADO DE LA TÉCNICA Y DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1. ANTECEDENTES.

#### 2.1.1. EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS EDIFICIOS.

El objetivo principal de esta tesis es mejorar el comportamiento energético de un edificio, reduciendo su consumo energético desde el punto de vista de las superficies acristaladas y estudiando los diversos tipos de vidrios, su comportamiento en cuanto a eficiencia energética se refiere y caracterización de los parámetros térmicos y ópticos, a partir de la influencia de la temperatura en el interior del ambiente.

Aunque en las últimas décadas se han producido algunas mejoras en los vidrios para acristalamientos exteriores, tales como el doble acristalamiento, los vidrios de baja emisividad o de control solar, la realidad es que el vidrio sigue siendo energéticamente menos eficiente que el resto de la envolvente opaca.

En los últimos años se ha comenzado a investigar en diferentes prototipos basados en vidrios de altas prestaciones, ya sean estáticos como el vidrio al vacío, o dinámicos. Esta tesis tratará de estudiar los nuevos tipos del acristalamiento dentro del grupo de los vidrios dinámicos, distinguiendo dentro de ellos los vidrios cromogénicos y por otro los vidrios con fluido en la cámara.

No podemos hablar de los cerramientos acristalados, ni de los sistemas existentes en vidrio, y por tanto de la eficiencia energética en el vidrio, sin dejar de lado el comienzo de la preocupación social por la eficiencia energética a nivel internacional, e incluso hoy en día a nivel nacional, gracias a la aprobación de la Certificación Energética de los edificios.

#### 2.1.2. EVOLUCIÓN HACIA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA HASTA NUESTROS DÍAS.

Hoy día el acristalamiento usado convencionalmente en viviendas no alcanza las cotas de eficiencia energética deseables en un edificio de máximo ahorro energético. Si consideramos a la ventana como unidad de obra nueva convencional, podemos decir que actualmente está formada por un doble acristalamiento, con carpintería de aluminio o PVC con o sin rotura del puente térmico y protección solar exterior o interior.

Según un estudio de ANDIMA<sup>1</sup> realizado en el 2007, tal y como muestra las siguientes gráficas, una tercera parte de la energía se consume en los edificios, seguida muy de cerca por el del transporte. Si se estudia más concretamente el consumo energético en las edificaciones de viviendas residenciales, se puede observar que el mayor consumo se genera en climatización con un 46%, luego el agua caliente sanitaria con 21%, electrodomésticos 16%, cocina 10% e iluminación

---

<sup>1</sup> ANDIMA. Asociación Nacional de Fabricantes de Materiales Aislantes. [www.andima.es](http://www.andima.es)

7%. En oficinas, los mayores consumos lo obtenemos en climatización con un 40% y en maquinaria con un 33%.

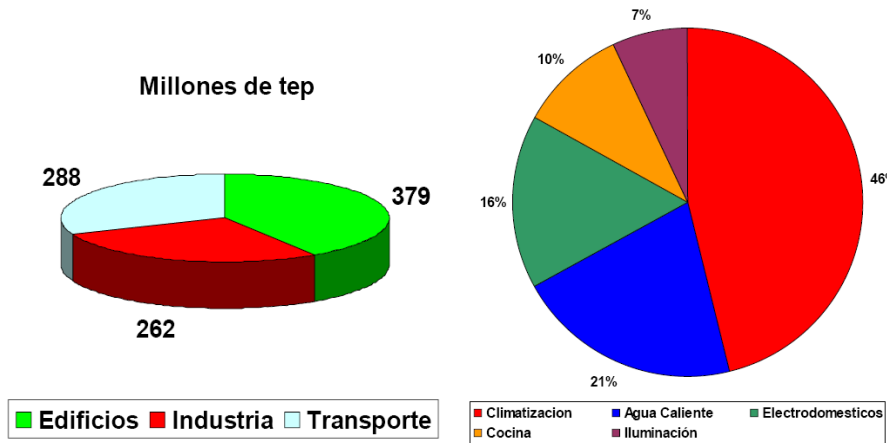
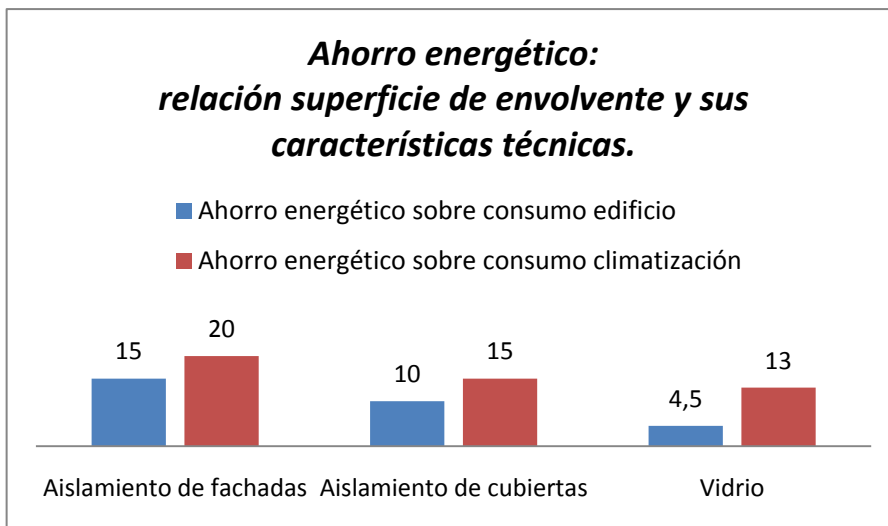


Fig. 2-1. Desglose del consumo energético en viviendas en España. Año 2007. Fuente ANDIMA

Por tanto, y según datos de ANDIMA, si por falta de aislamiento en cerramientos opacos estamos perdiendo hasta un 60% de energía, podemos decir, que un 40%, se nos va por los cerramientos transparentes.

En la siguiente gráfica se muestra que la superficie acristalada así como la elección y estudio de sus características técnicas puede tener hasta un 13% de ahorro energético sobre el consumo total de climatización.



Gráfica 2-1. Gráfica realizada a partir de los datos "Guía de Rehabilitación Energética de edificios de vivienda"

Internacionalmente hablando, a partir del desarrollo industrial, las actividades humanas han incidido tan fuerte sobre el equilibrio ambiental del planeta que actualmente el sector energético se encuentra en una fase de transición. Por una parte, aumenta no solo la demanda energética sino también el impacto ambiental,

por otro, los recursos de los combustibles fósiles, que se encuentran en una disminución gradual.

La crisis del petróleo de 1973, y la consiguiente alza en los precios de la energía, generalizó en toda Europa un sentimiento de temor de que las fuentes energéticas podían escasear e incluso llegar a faltar. Ante esta situación, se buscaron medidas que limitasen el consumo energético, y una de ellas fue la aparición de normas de edificación, en particular las que pretendía regularizar el uso del aislamiento en los edificios.

Desde la década de los setenta, ha surgido una creciente demanda social por un crecimiento sostenible, originado por una parte por la crisis energética iniciada por la subida del precio del petróleo, y por otra parte por un cada vez mayor y mejor análisis de la repercusión en el ambiente de nuestras actividades.

Solo a través de la adopción de soluciones técnicas adecuadas, se podrá asegurar el desarrollo sostenible del ser humano. Nos encontramos aquí ante un nuevo concepto, el de desarrollo sostenible, difícil de definir y de separar a la palabra eficiencia energética. *"Hay que entender desarrollo sostenible como el desarrollo capaz de satisfacer los requisitos del presente sin comprometer las capacidades de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades. Esto no significa volver a un estilo de vida pasado y renunciar al bienestar y al desarrollo cultural y tecnológico, sino garantizar todo eso sin poner en peligro los recursos del planeta"*<sup>2</sup>.

La primera intervención a nivel mundial tuvo lugar en 1988 y estuvo destinada a la creación de un organismo, definido como "International Panel on Climate Change" (IPCC) que tenía la función de estudiar los cambios climáticos debidos a la acción del hombre sobre el planeta y fue establecida por la ONU.

En dicho contexto, como respuesta a esta situación y como medio para dar una solución a todos estos problemas, se abre desde una perspectiva internacional grandes protocolos destinados tanto a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> si como a la sostenibilidad del planeta.

Los dos primeros están relacionados con la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Se trata del protocolo de Kioto y de Bali, enmarcados dentro de la Convención del Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

- El primero de ellos, el Protocolo de Kioto (Japón), en el que el 11 de diciembre de 1997, 125 países se comprometieron, a ejecutar un conjunto de medidas para reducir los gases de efecto invernadero. Los gobiernos signatarios pactaron reducir en un 5% de media las emisiones contaminantes entre 2008 y 2012, tomando como referencia los niveles de 1990. El acuerdo entró en vigor el 16 de febrero de 2005, después de la ratificación por parte de Rusia el 18 de noviembre de 2004. El objetivo principal es disminuir el cambio climático cuya base es el efecto invernadero y tiene por objeto reducir las emisiones de seis gases provocadores del calentamiento global en un porcentaje aproximado de un 5%, dentro del periodo que va desde el año 2008 al 2012.

---

<sup>2</sup> (Marino & Greco, 2007).

- El segundo, el Protocolo de Bali. Del 3 al 14 de Diciembre de 2007, y para sustituir el protocolo de Kioto, 190 países de todo el mundo, se reunieron en Bali (Indonesia), para desarrollar un nuevo protocolo que sustituya al de Kioto, cuando éste expire en el 2012.

Los siguientes, se relacionan con la sostenibilidad, desarrollo de energías renovables y protección de los recursos de los que dispone nuestro planeta, así como su conservación. Se trata del protocolo de Montreal y del programa 21 de la ONU.

- El Protocolo de Montreal, AGENDA 21, dentro del Programa Nacional de las Naciones Unidas y relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono se concertó el 16 de septiembre de 1987 y entró en vigor el 1º de enero de 1989. Propone el desarrollo de las energías renovables, disminuir los impactos sobre la salud y el medio ambiente de la producción y consumo de energía y el fomento de una educación hacia el desarrollo sostenible. Desde entonces, ha sufrido cinco revisiones, en 1990 en Londres, 1992 en Copenhague, 1995 Viena, 1997 Montreal, y en 1999 Beijing.
- El Programa 21 de la ONU, plantea el control de aquellas sustancias que producen el agotamiento de la capa de ozono. es un plan de acción que engloba todas las cuestiones del desarrollo sostenible, entre las que se cuentan: la contaminación de la atmósfera, el aire y el agua; la lucha contra la deforestación; la desertificación y la pérdida de terrenos agrícolas; el combate a la reducción de las poblaciones de peces; la promoción del manejo seguro de los desechos sólidos. El desarrollo del programa 21 se inició el 22 de diciembre de 1989 con la aprobación en la asamblea extraordinaria de las Naciones Unidas en Nueva York de una conferencia sobre el medio ambiente y el desarrollo y con la elaboración de borradores del programa que culminó con la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo mejor conocida como Cumbre de Río o Cumbre de la Tierra, llevada a cabo del 3 al 14 de junio de 1992 en Río de Janeiro, en donde representantes de 179 gobiernos acordaron adoptar el programa.

A nivel europeo los problemas ambientales se han considerado desde hace décadas. A partir de la cumbre de París en 1972, en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre medio ambiente, se definió el primer programa de acción para el ambiente con el objetivo de adoptar políticas ambientales destinadas a direccionar las normativas y los programas de investigación científica de los estados miembros.

Dando respuesta a estas actuaciones mundiales la Unión Europea ha desarrollado normativas, tendentes a la mejora de la eficiencia energética y a la seguridad y diversificación de los suministros. Así ha desarrollado: La Directiva 93/76 de 13.09.93 (SAVE), El Libro Verde, y por último la Directiva 2002/91/CE. En esta última publicada por el Parlamento Europeo y el Consejo sobre el rendimiento energético, disponía la necesidad de acelerar las acciones de ahorro energético y reducir las diferencias entre los estados miembros, mediante disposiciones legislativas reglamentarias y administrativas de cada uno de los países miembros. Era el nacimiento de la Certificación Energética. Actualmente, la Unión Europea

tiene dos prioridades básicas, siendo una de ellas la eficiencia energética en viviendas, y ésta, contribuir a la reducción de CO<sub>2</sub>.

En España, la situación es muy distinta que en el resto de Europa. Desde 1957, la preparación de la normativa técnica de la edificación- (antiguas normas MV) pasa a ser responsabilidad del Ministerio de la Vivienda, tarea que venía desarrollando la Dirección General de Arquitectura del Ministerio de Gobernación, creada en 1937. En 1977 el Gobierno aprobó un marco unificado para la normativa de la edificación que estaba compuesto por:

- Normas Básicas de la Edificación (NBE), de obligado cumplimiento, dando rango de NBE y unificando las entonces vigentes normas básicas MV (Ministerio de Vivienda).
- Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE), sin carácter obligatorio, aprobadas en esa misma década, que servían como el desarrollo operativo de las NBE y como compendio de soluciones constructivas tradicionales.
- Soluciones Homologadas de la Edificación (SHE), cuyo desarrollo no ha tenido lugar, y que hubieran complementado en el campo de las soluciones constructivas convencionales o tradicionales a los Documentos de Idoneidad Técnica (DIT), evaluaciones técnicas favorables para las soluciones innovadoras otorgadas por el Instituto Eduardo Torroja.

El 6 de mayo de 2000 entró en vigor la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE). En su Disposición final, la LOE autoriza al Gobierno para la aprobación de un Código Técnico de la Edificación (en adelante CTE), que establezca las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad. Para fomentar la innovación y el desarrollo tecnológico, el CTE, aprobado finalmente el 17 de Marzo de 2006, adopta un enfoque internacional más moderno en materia de normativa de edificación, son los llamados Códigos basados en prestaciones u objetivos, que son las exigencias que han de cumplir el edificio y las características de sus materiales, productos o sistemas. Este enfoque por objetivos se alinea con el denominado "enfoque basado en prestaciones", propugnado por las principales organizaciones internacionales relacionadas con los códigos de edificación, tales como el Consejo Internacional para la Investigación e Innovación de la Edificación y Construcción, CIB, o el Comité Interjurisdiccional de Colaboración Reglamentaria, IRCC. Del mismo modo se busca adaptarse al ámbito de la Unión Europea, y algunos países más avanzados en materia de normativa entre los que destacan entre otros: Reino Unido (1984); Australia (1998); Canadá (1995-2003); Países Bajos (1996); Noruega (1998) y Estados Unidos (2001).

Según Marino<sup>3</sup>, entre los países de la UE, Dinamarca es el que ha desarrollado y adoptado los mejores esquemas de certificación energética a partir del año 1981, siendo un ejemplo de buena práctica para los otros países Europeos, partiendo ya de la base que todavía no cumple los requisitos establecidos por dicha Directiva.

---

<sup>3</sup> (Marino & Greco, 2007)

En materia de energía, el CTE, permite satisfacer, entre otros, los requisitos básicos de ahorro de energía y aislamiento térmico establecidos en el artículo 3 de la Ley 38/1999, de 5 de Diciembre, de Ordenación de la Edificación (LOE).

El procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios se ha presentado con el Código Técnico de la Edificación, Documento Básico "Ahorro de Energía" y Real Decreto 47/2007 por el que se aprueba la calificación energética de los edificios. Este certificado deberá incluir información objetiva sobre las características energéticas de los edificios de forma que se pueda valorar y comparar su eficiencia energética, con el fin de favorecer la promoción de edificios de alta eficiencia energética y las inversiones en ahorro de energía.

Por ello, desde el pasado 31 de Enero de 2007, fecha de publicación en el BOE, los nuevos edificios deberán disponer de la correspondiente certificación energética.

Con ello el usuario dispondrá de información sobre el comportamiento térmico de cada oficina o vivienda. La clasificación de las oficinas o viviendas se realiza siguiendo una escala de letras (de la A a la G en orden decreciente de eficiencia energética) y de colores, tal y como explica la figura adjunta. Para cumplir con lo exigido por el CTE la oficina o vivienda debe tener como mínimo una clasificación G. Para determinar la clase que le corresponde a un edificio concreto, se valorará el CO2 emitido por el consumo de energía del global de sus instalaciones.

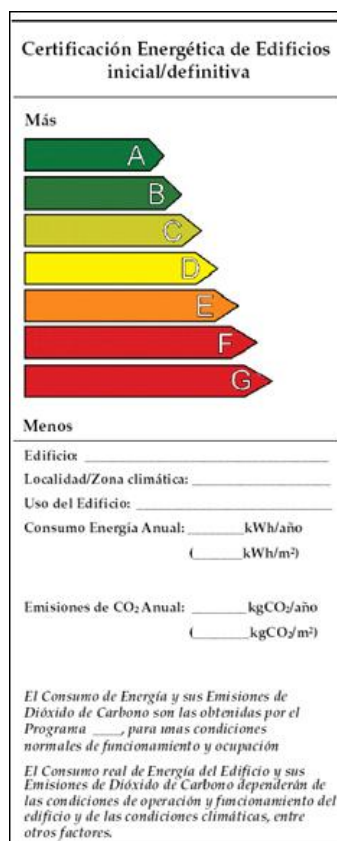


Fig. 2-2. Ficha calificación de Energética de Edificios en España.



### 2.1.3. ANTECEDENTES Y PROTOTIPOS DE VIVIENDAS EFICIENTES.

La casa de vidrio es una de las propuestas de diseño más significativas en el movimiento moderno. Las implicaciones formales, estructurales arquitectónicas y constructivas de un proyecto de vivienda cuyo principal material de cerramiento es el vidrio, presenta un nuevo modo de entender la manera de habitar, de construir y de plantear la nueva vivienda del siglo XX. Las posibilidades constructivas que conllevó la evolución de las técnicas y de los materiales a comienzos del siglo XIX, repercutieron en las propuestas arquitectónicas de las generaciones de la época permitiendo el florecimiento de una nueva tipología de edificios, como la creación arquitectónica de gran belleza y como forma del futuro. Se trataba del nacimiento del hierro como material estructural para uso en edificación y la general difusión de la industrialización que tuvo el impacto del vidrio, tendencia que culminó en el Palacio de Cristal de Joseph Paxton, construido en 1851 para la Gran Exposición de Londres.



Fig. 2-3. Imágenes del Crystal Palace de Londres. Vistas exterior e interior de la época.  
Fuente: historiarte

Para mediados del siglo XIX, la estructura de acero usada en conjunción con el cerramiento de vidrio modular, se convirtió en la técnica estandar para la prefabricación y el levantamiento de nuevos almacenes, mercados y estaciones de ferrocarril según las nuevas necesidades urbanas.

La Maison de Verre, diseñada en 1928, y construida en París en 1932 por Pierre Chareau, constituye sin duda el gran salto de la arquitectura doméstica a la hora de adaptar las nuevas tecnologías, ya aplicadas en edificios públicos.

La casa, que se asienta sobre un edificio anterior, busca iluminar el interior de la nueva vivienda, que por su estrechez y ubicación en el patio de manzana carecía de luz natural. Esta exigencia aconsejó el uso de estructura metálica y la elección de bloques de vidrio translúcidos para las fachadas que permitían el paso de la luz más el resguardo de la privacidad, propia de un hogar, tal y como muestra la siguiente figura

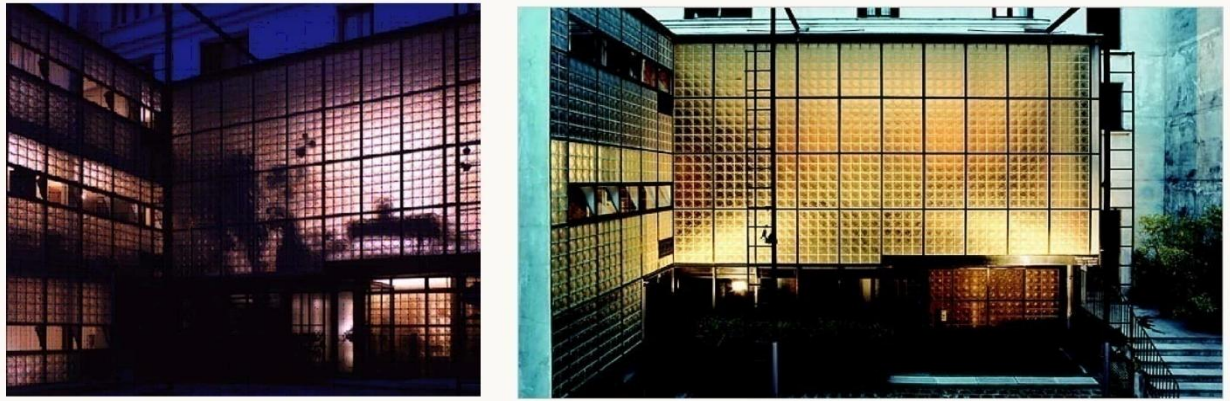


Fig. 2-4. Exterior de la Maison de Verre. Fotografías tomadas por Nicolai Ouroussoff.

El Tratamiento de fachada supone una novedad por cuanto parecen reflejarse en su superficie los ideales de la vanguardia arquitectónica del momento: nuevos materiales, diseño moderno, elementos estandarizados y un proceso constructivo industrializado cuyo fin inmediato era la rapidez de ejecución y el abaratamiento de costes.

La materialización de las posibilidades máximas del vidrio en la arquitectura moderna, llegaría de la mano de Luis Mies Van der Rohe. Su legado arquitectónico sigue siendo un referente claro en la arquitectura contemporánea en cuanto a claridad estructural, tecnología aplicada a la arquitectura y depuración formal, utilizando el vidrio como primer material para investigación, desarrollando varios estudios en los que empleaba grandes superficies de este material para revestir los edificios.

Desde una perspectiva general, podría considerarse a la casa Farnsworth como un contenedor rectangular de cristal, sostenido por una superficie plana, idéntica a la que le sirve de cubierta. Una caja acristalada que permite el paso de la luz, tal y como se muestra la siguiente figura.



Fig.2-5. Casa Fansworth. Plano. Illinois. Fuente: Farnsworthhouse.

La escasez de los elementos empleados en la construcción de la vivienda representa una síntesis de la filosofía constructiva minimalista de Mies: "menos es más". De este modo, se produce una negación de la propia materialidad de lo construido, careciendo completamente tanto de los muros exteriores sustituidos

por un acristalamiento de suelo a techo, como de los interiores. El predominio absoluto del cristal alude a la idea de conexión entre lo interior y lo exterior, entre lo público y lo privado.

No solo hablamos de casas de mediados del siglo XX, sino que actualmente se están realizando obras cuyo material principal de cerramiento es el vidrio, como el Glass Pavilion, Museum of Art, Toledo, Ohio, USA 2006 ,de SANAA Architects (Kazuyo Sejima + Ryue Nishizawa), en el que el vidrio juega dos papeles fundamentales: estructural y cerramiento; la casa Casa Veluwe construida por Powerhouse Company en Veluwe. Holanda en el 2008 y la casa White 0, construida por Toyo Ito, en Marbella (Chile) en el 2009.

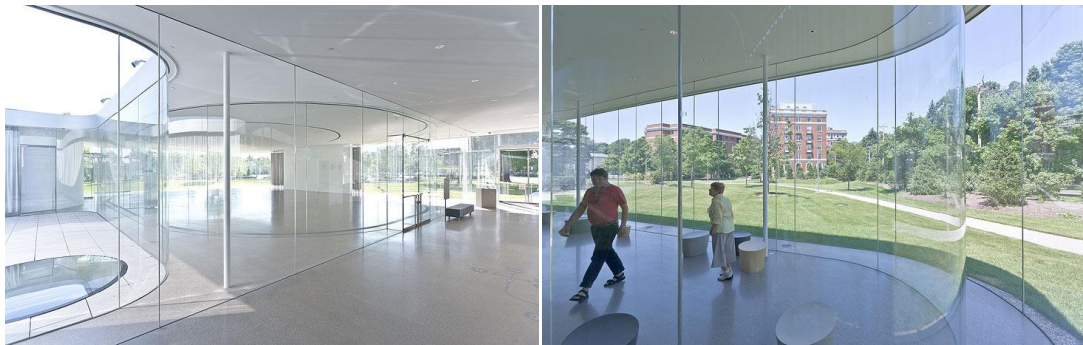


Fig. 2-6. Glass Pavilion, Museum of Art, Toledo. Fuente Iwan Baan.



Fig. 2-7. Casa Veluwe. Holanda, Powerhouse Company. Fuente: Diseño Interior nº 207. octubre 2009. pp. 82-95.

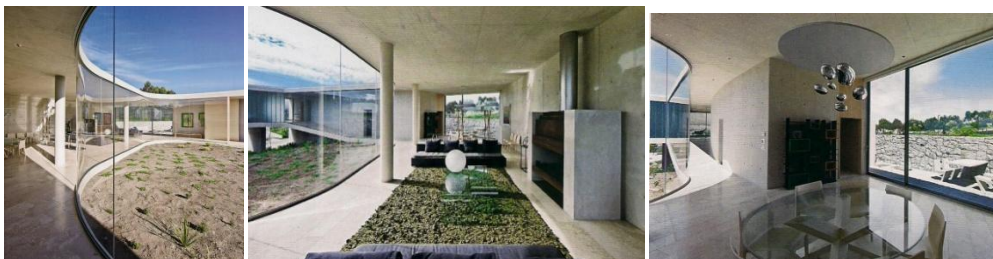


Fig. 2-8. Casa White 0. Marbella, Chile, Toyo Ito. Fuente: Diseño Interior nº 211. febrero 2010. pp. 56-69

Actualmente los fabricantes de vidrio para arquitectura han mejorado sus cualidades de transparencia, aislamiento, seguridad y comodidad. Hoy en día, el acristalamiento de un edificio se ha convertido en un complejo sistema que prevé

resolver los problemas de iluminación, ventilación, humedad, polvo, sonido, climatización y hasta protección con respecto a los rayos ultravioleta e infrarrojos.

El actual enfoque bioclimático de la arquitectura, que plantea un hábitat lo más adaptado a las condiciones ambientales y de bajo consumo energético, utiliza el vidrio en fachada sur (en hemisferio Norte) para la captación solar invernal, con objeto de reducir al mínimo el uso de la calefacción.

Las casas solares buscan además obtener mediante instalaciones de captación toda la energía necesaria en la vivienda.

## **2.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS CERRAMIENTOS ACRISTALADOS**

### **2.2.1. EL USO DE LAS SUPERFICIES TRANSPARENTES PARA EL AHORRO ENERGÉTICO.**

Se ha discutido anteriormente sobre la importancia en la edificación acerca de los consumos finales de energía independientemente del área geográfica considerada. Como se va a comentar detalladamente en los capítulos sucesivos, las superficies transparentes representan el eslabón débil energéticamente hablando de la cadena de componentes que constituyen la piel del edificio. Mientras menos datos se tengan sobre los consumos energéticos en la edificación, más difícil se hace la evaluación de la influencia de las superficies transparentes sobre tales consumos.

A partir de la Tesis Doctoral de Michele Zinzi<sup>4</sup>, se han obtenido los siguientes datos:

- *El 60% de las habitaciones en Europa están aún equipadas con ventanas con vidrio sencillo, con la consiguiente caída de prestaciones energéticas.*
- *Si todas las ventanas fueran equipadas con vidrios bajo emisivos se obtendría un ahorro anual del orden de 815 millones de MJ y 49 millones de toneladas menos de CO<sub>2</sub> emitidas.*

Junto a estos datos de tipo técnico-económico, hay otros aspectos importantes a considerar como:

- Las ventanas y amplias superficies vidriadas pueden reducir los costes de iluminación artificial y aumentar la ganancia solar.
- Control de las cargas térmicas en el ambiente y el bienestar.
- Mejora del aislamiento acústico.

La situación para los países de la comunidad Europea se puede extraer de la tabla siguiente, en la que se detalla el porcentual de ventanas con vidrio sencillo.

---

<sup>4</sup> (M. Zinzi, 1999)

Tabla 2-I. Situación actual sobre las ventanas en la edificación en Europa en 1999. Fuente: Tesis doctoral Michele Zinzi.

<b>PAÍS</b>	<b>% VIDRIOS SENCILLOS</b>
Bélgica	57
Dinamarca	0
Alemania	35 (Oeste) 51 (Este)
España	92
Francia	53
Italia	84
Holanda	52
Inglaterra	65

La tabla 2-I indica un ejemplo positivo, como el danés, con un 52% en la utilización de vidrios sencillos, y un ejemplo negativo, como el caso español y el italiano, con un 92% y un 83% respectivamente, con climas similares.

### **2.2.2. CAPTACIÓN, PÉRDIDAS, TRANSPARENCIA Y VENTILACIÓN.**

El vidrio en una envolvente acristalada, juega un papel vital en el intercambio de energía del edificio, siendo un elemento de expresión arquitectónica fundamental como se ha demostrado a lo largo de los siglos XIX y XX.

Sabemos que el hueco es el elemento a través del cual más energía se transmite y también que un buen diseño podría minimizar estas pérdidas o ganancias.

La siguiente figura representa la distribución superficial de la temperatura en la casa Solar Decathlon 2007, obtenida mediante termografía de infrarrojos, técnica basada en la radiación infrarroja emitida por los cuerpos.



Fig.2-9. Termografía del prototipo SD7 con vidrios bajo emisivos. Fuente: archivo Inviso.

En la actualidad la industria de la construcción cuenta con una serie de vidrios que tratan de mejorar las prestaciones energéticas del vidrio sencillo en las direcciones en las que se aprecian sus debilidades, es decir, pérdidas térmicas o bajo aislamiento con tiempo frío y ganancias térmicas excesivas por soleamiento en tiempo cálido. Hablamos, entre otros, del doble acristalamiento y vidrios bajo emisivos y de control solar. Éstos, funcionan muy bien y proporcionan un gran ahorro energético, y aunque siendo eficientes en unas condiciones muy concretas, pueden resultar perjudiciales en otras épocas. De hecho, según diversas fuentes, se estima que la instalación de vidrios bajo emisivos podría reducir las aportaciones solares en verano hasta un 50%. Sin embargo, estos vidrios en invierno, pueden resultar contraproducentes en aquellas orientaciones que deseen ganancias solares, como puede ser en orientación sur en climas fríos. Estos vidrios, no tienen la posibilidad de cambiar sus propiedades, son los que denominaremos vidrios estáticos y el análisis de sus prestaciones reales nos servirá para una mayor profundización en el estudio de los denominados cromogénicos.

Habida cuenta del peso que tiene la cuestión energética y que los vidrios cromogénicos, según la documentación analizada en el punto 2.2, no pueden por si mismos aportar todas las prestaciones deseadas en el aspecto energético, se estudia por tanto otro tipo de vidrios, también de propiedades cambiantes, pero en este caso, la mejora se obtiene gracias a la circulación de un fluido circulante por su cámara.

Otro modo de conseguir un ahorro energético es mediante la combinación de distintos tipos de vidrios, con una cámara de aire en su interior en sistemas complejos como puede ser una fachada de doble piel de vidrio. El protagonista principal, en esta tecnología, es el aire y su circulación dentro de dicha cavidad. La doble piel es usada principalmente en oficinas y edificios de gran altura, con el objetivo de permitir una ventilación natural sin crear fuertes circulaciones de aire muy incómodas para el usuario, como ocurre en las oficinas de las últimas plantas en rascacielos. Esto condiciona bastante el estado de la técnica, ya que esta tecnología es de difícil aplicación a viviendas, debido al gran espesor de la cámara. No obstante se ha llegado a utilizar en prototipos de casas solares.

Por lo tanto, fachadas de doble piel, vidrios cromogénicos y los vidrios con fluidos circulantes en su interior son tres estrategias conocidas que podrían mejorar la eficiencia energética de los acristalamientos convencionales.

Es bien conocido, que uno de los aspectos positivos del vidrio es su transparencia, proporcionando un sinfín de posibilidades en el ámbito arquitectónico y de expresión plástica, abarcando un sin fin de soluciones funcionales, ya sea con respecto a la iluminación natural, o bien aspectos de percepción o comunicación visual. Es por ello que el vidrio está considerado como un material único en construcción.

Se pueden definir cuatro factores básicos a estudiar en el vidrio, ya sean vistos como cualidades, o bien como defectos. Estos cuatro elementos a su vez pueden convertirse en estrategias arquitectónicas de diseño bioclimático.

- **Captación.** El vidrio, debido no solo a su alto coeficiente de transmisión de calor, (mucho mayor que el de cerramiento opaco), sino, sobre todo, porque a través de él penetra la radiación solar, presenta una alta captación solar, que, en invierno puede resultar beneficiosa para el calentamiento del ambiente interior, reduciendo de este modo las cargas térmicas de calefacción, y en verano, un sobrecalentamiento provocaría un aumento de las cargas de aire acondicionado. Desde la visión exclusiva de la época estival, las orientaciones óptimas son aquellas en las que se recibe la menor radiación a lo largo del día: Orientación norte. Debido a las condiciones climáticas comunes en el hemisferio norte, es necesario aprovechar durante el periodo frío la radiación solar captada directamente a través de los acristalamientos, y evitarla durante el verano. Neila (2004)<sup>5</sup> describe:

*“mientras que un hueco orientado a Este u Oeste en el mes de Julio puede llegar a captar 488 W/m<sup>2</sup>, un hueco orientado a Sur, ese mismo mes solo capta como máximo 289 W/m<sup>2</sup>, y uno orientado a Norte 144 W/m<sup>2</sup>. Estos datos deberían ser suficientes para señalar como orientaciones más favorables la Sur y la Norte. Si a ello unimos que las captaciones en Enero, para esos mismos huecos Este-Oeste, Sur y Norte, son respectivamente 198,380 y 70, no cabe duda que la orientación Sur es la más adecuada a lo largo de todo el año”.*<sup>6</sup>

- **Pérdidas.** Al igual que se ha comentado en el punto anterior, el vidrio, por su alto coeficiente de transmisión, tiene la misma facilidad para captar ese calor que para perderlo. Esta característica del vidrio es desfavorable tanto en invierno como en verano. En invierno, por la pérdida del calor acumulado y en verano, por el frío almacenado, ya sea por factores activos (bomba de calor) o pasivos, tenderá siempre a perderlo. Las mayores pérdidas se suelen dar en la noche. Es por ello la conveniencia de colocar en el vidrio protecciones solares, ya sean persianas o cortinas realizadas con aislamiento térmico, para evitar excesivas pérdidas del calor o frío acumulado.

---

<sup>5</sup> (Neila González, 2004)pp. 443

<sup>6</sup> Ibid

- **Transparencia.** Una de las cualidades más notables del vidrio, debido a su estructura física, es la transparencia, que nos permite tener un amplio campo visual, característica que no está conseguido por ningún otro material existente en el mercado, con la misma durabilidad del vidrio. Debido a que se trata de una cualidad única, no podemos perder la oportunidad de aprovecharla. En verano, muchos de los elementos que se usan para evitar un sobrecalentamiento es el uso de protecciones solares, que nos limitan y/o impiden la visión. Es por ello, por lo que muchas investigaciones que se desarrollan actualmente van en la dirección de la eliminación de estas protecciones solares, con el tintado o cambio de transparencia del vidrio, bien en función a las condiciones climáticas a la que es expuesto o bien mediante la operación del usuario.
- **Ventilación.** La ventilación es una característica de múltiples aplicaciones en condiciones de verano e incluso en invierno, motivo por el que ha sido objeto de utilización y empleo a lo largo de todos los tiempos, y que en la actualidad se utiliza como una importante estrategia bioclimática. El principal campo de aplicación está en las fachadas de doble piel.

En este capítulo nos vamos a centrar sobre todo en qué métodos podemos utilizar para mejorar esta eficiencia energética, en otras palabras, en la optimización de la envolvente de vidrio.

Una envolvente de vidrio puede ser mejorada en cuanto a eficiencia energética se refiere de las siguientes formas:

- Uso de la fachada de doble piel de vidrio. El uso de la fachada de doble piel y ventilación cruzada, es especialmente adecuado para modificar la inercia de la envolvente en función de las condiciones ambientales existentes en el exterior, principalmente en las noches de veranos y los fríos días soleados de primavera y otoño.
- Utilización de nuevos tipos de vidrio que han ido apareciendo para conseguir una mejora del ahorro energético, tales como vidrios bajo emisivos, de control solar, y por último, donde nos centraremos más detenidamente, en los vidrios cromogénicos, dentro del grupo de los dinámicos.
- Utilización de vidrios con fluido circulante en la cámara, como alternativa más prometedora a priori, según la documentación técnica analizada en el punto 2.2.

### **2.2.3. EVOLUCIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL VIDRIO.**

Resulta conveniente realizar una pequeña introducción de la evolución de la eficiencia energética que ha sufrido este material a lo largo de los siglos.

Fueron los romanos quienes empezaron a utilizar el vidrio con propósitos arquitectónicos, con el descubrimiento del vidrio transparente, a través de la introducción del óxido de Manganeseo, en Alejandría alrededor del 100 D/C. Ventanas, de alrededor de 1m<sup>2</sup> y cualidades ópticas bastante pobres, comenzaron a aparecer en los más importantes edificios en Roma y las villas más lujosas de Pompeya. Las ventanas formaban parte de la arquitectura, pero la luz estaba



generalmente diseñada para penetrar en las construcciones a través de óculos en cubiertas, tal y como se puede observar en el Panteón de Roma, conocido también por el Panteón de Agrippa (27A/C).

Siglos más tarde, vieron un gradual desarrollo de la idea del vidrio como importante material en ventanas, y no únicamente como pantalla protectora de las inclemencias del tiempo. Este desarrollo de la ventana, queda expresado en el siguiente párrafo extraído de Pizano (2001)<sup>7</sup>

*"El uso de pequeñas láminas de vidrio como cerramiento de ventanas era una práctica muy común en el mundo romano y posteriormente cristiano e islámico. Los primeros vidrios utilizados como cerramiento de ventanas en edificios públicos romanos, posiblemente hacia el siglo I d.C., eran vidrios planos fabricados mediante el método de vertido o colado en mesas, moldes o bandejas, cuya superficie podía ser de metal, piedra, mármol o madera humedecida. El tamaño de las distintas láminas obtenidas podía ser de superficie relativamente grande, siendo las de mayor tamaño encontradas de 100 x 70 cm, en unas termas de la ciudad de Pompeya. Su espesor medio oscilaba entre los 2 y 15 mm de grosor. Para cubrir todo el hueco de los ventanales era necesaria su compartimentación mediante marcos sustentantes en madera, cobre o escayola, los cuales cumplían también una función decorativa. Este tipo de ventanas era conocido como claustra o transennae. No obstante, y a pesar del gran éxito alcanzado por las láminas de vidrio como cerramiento de ventanales, éstas constituyeron siempre un cierto lujo en el mundo romano".*

Acercándonos a la época moderna, los avances del siglo XX permitieron abrir más huecos en fachada y unas dimensiones mucho mayores que las anteriormente permitidas por consideraciones estructurales.

Las fachadas de vidrio de 1 hoja tienen su antecedente más notorio en el Crystal Palace de Joseph Paxton, creada para la Gran Exposición de Londres, aunque el sector de los jardineros ingleses ya conocía el potencial de captación solar del vidrio.

Es en 1882 cuando Edward Morse construyó el primer muro solar de la historia que constaba de una hoja exterior de vidrio, una chapa corrugada pintada de negro y un muro de fábrica detrás. Mediante aperturas y rejillas, se podía circular el aire de la cámara hacia el interior de la vivienda o hacia el exterior según necesidades térmicas de la casa.

En 1929 Le Corbusier enunció el principio del muro neutralizante "mur neutralisant" que intentó llevar a cabo en su edificio de la "Ciudad Refugio" en París. La idea era crear una envolvente por la que circulase aire a una temperatura constante de 18º, neutralizando de esta manera en el interior la influencia de los cambios meteorológicos. El concepto que defendía Le Corbusier se basaba en que las pérdidas y ganancias por transmisión, desaparecerían al hacer circular aire a más baja temperatura por la cámara. Obviamente, Le Corbusier, fallaba al no darse cuenta que la circulación del aire necesita energía para ser calentado o enfriado.

---

<sup>7</sup> (Cortés Pizano, 2001). pp. 10-19.

Por falta de presupuesto este edificio y por su ineficiencia, se realizó sin la segunda piel de vidrio, y sin sistema de climatización, con una sola piel estanca que producía mucho calor en verano, mucho frío en invierno y unas condensaciones galopantes. Por este motivo hubo que instalar más tarde ventanas practicables en la fachada. El fracaso de este edificio por causas diversas no empaña ni un ápice la inspiración del concepto de cámara de aire de temperatura controlada.

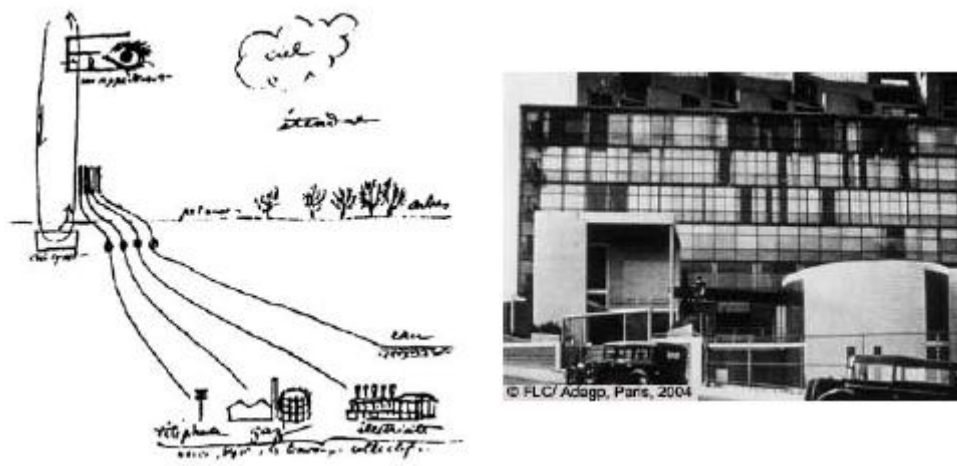


Fig. 2-10. El muro neutralizante en "Ciudad refugio". París. Fuente: Lauret (2007)

En 1929, Alvar Aalto, en el Hospital para tuberculosos de Paimio, diseñó una ventana que permitía calentar el aire antes de que penetrara en su interior, debido a las persistentes quejas de los pacientes acerca del frío que padecían en el hospital.

Mientras Le Corbusier estaba trabajando en la teoría y no en la práctica del muro neutralizante en Francia, en 1930, unas ideas más prácticas hacia el progreso en fachadas múltiples se estaban desarrollando en EEUU. El primer paso significativo fue la comercialización de la patente Themopane hacia 1935, que consistía en un doble acristalamiento producido por Libbey Owens Ford (LOF) que comprendía dos láminas de vidrio herméticamente selladas, separadas por una cámara de aire de 12mm. Este doble acristalamiento fue incorporado a las "casas solares" que estaban siendo diseñadas en Chicago por el arquitecto George Fred Keck.

Los primeros estudios de circulación y flujos de aire en ventanas fueron publicados en los años 50 en Escandinavia. El objetivo era mejorar la eficiencia energética y el confort térmico de la carpintería en edificios residenciales. En 1957, en Suecia, tuvo lugar la primera patente relacionada con flujo de aire-ventanas, y fue en 1967, cuando la compañía EKONO, construyó el primer edificio de oficinas equipadas con ventanas y flujo de aire, en Helsinki, Finlandia. En este modelo de ventanas, las carpinterías interior y exterior están conectadas mecánicamente y ambas pueden ser abiertas como si de una sola ventana se tratase. Y lo que es más, solo hacía falta un solo marco de carpintería, en vez de dos, como venía siendo utilizado tradicionalmente. En algunos casos, protecciones solares se insertaban entre las dos láminas de vidrio. El aislamiento térmico no era tan bueno como con la box-window, puesto que la distancia entre paneles es menor y la carpintería en si misma provee menos aislamiento.



En la Fig.10 se muestra un anuncio a página completa de Thermopane. Se intenta sugerir el uso de doble acristalamiento. Los fabricantes de vidrio estaban trabajando en desarrollar el entendimiento y apreciación del público por los beneficios del uso de estos nuevos acristalamientos en todo tipo de edificios, ya sea comercial o residencial.

Fig. 2-11. Anuncio a página completa de la patente Thermopane. Fuente: <http://remiss63.blogspot.com/2005/09/magic-chef-bldg-thermopane-glass.html>

Pero el diseño de la energía solar pasiva, se ve ejemplificada realmente en el “muro trombe”, como moderno precursor del sistema de doble piel gracias el ingeniero Félix Trombe hacia 1960, basada en la olvidada patente de Edward Morse en 1882.

### DIFERENTES USOS DEL MURO TROMBE

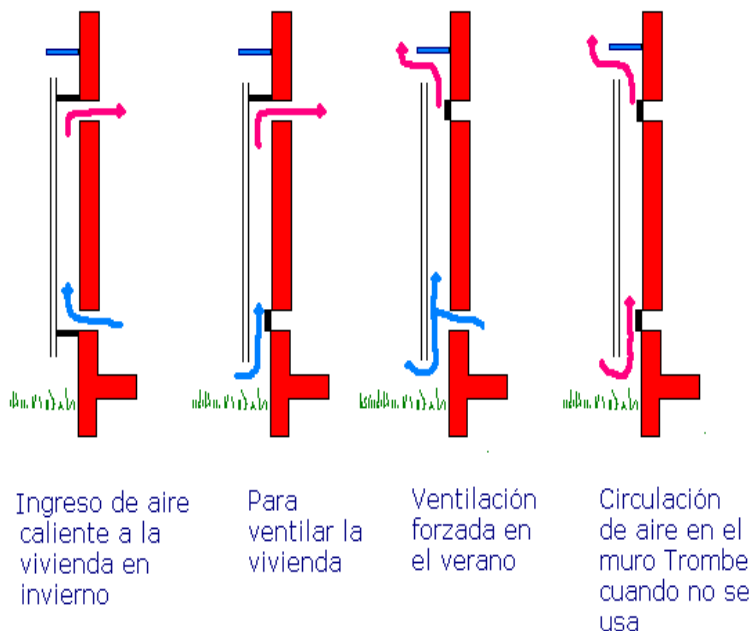


Fig. 2-12. Diferentes usos del muro trombe. Fuente: <http://www.autosuficiencia.com.ar>

La eficiencia energética y el confort térmico, no fue una preocupación exclusiva de los países nórdicos, sino que poco a poco el resto de Europa comenzó a tomar

conciencia del problema. En 1903, la Fábrica R. Setiff, Giengen on the Brenz y el Hallidie Building en San Francisco, son uno de los ejemplos más tempranos de doble fachada (sin ventilar) de vidrio, que poco a poco se fueron implementando en numerosos edificios por toda Europa. Pero el máximo desarrollo de estas patentes no se vería hasta que no tuvo lugar la crisis energéticas de 1973 y 1979.



Fig. 2-13. Hallidee Building. Fuente:  
<http://www.noehill.com/sf/landmarks/nat1971000185.asp>

En 1961 se realiza la Vallasey School, de E. Morgan que incorporaba una doble piel de vidrio con una cámara de 60cm, siendo transparente la exterior y traslúcida la interior. En el interior de la cámara había otros paneles negros por una cara y de aluminio pulido por la otra que permitían controlar la energía captada o reflejada por el cerramiento.

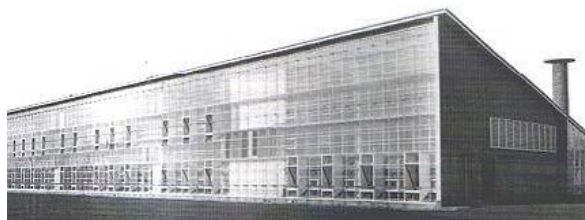


Fig. 2-14. Vallasey School. 1961. Fuente: Lauret (2007).

Otros ejemplos de fachada de doble piel de vidrio son por ejemplo la biblioteca de la Facultad de Historia de la Universidad de Cambridge, de James Stirling, en el que se incorporó una fachada de vidrio para mejorar el aislamiento general del edificio, manteniendo altos niveles de iluminación. Igualmente en 1969 se construye en Paris el primer rascacielos de vidrio, la Torre Novel, proponiendo Jean Prouvé para su fachada una doble piel de vidrio con objeto de mejorar las prestaciones energéticas de la envolvente, aunque aún se trataban de cámaras de aire estancas sin ventilaciones.

Tal y como indica Allan Dickson (2004)<sup>8</sup>, la crisis de las energías renovables entre 1973 y 1979, empujó el desarrollo de innovaciones en el vidrio (capas de baja emisividad y aparición de cámaras rellenas con gases inertes), así como la

---

<sup>8</sup> (Dickson, 2004)

aparición de una creciente preocupación acerca del consumo energético. En esa misma época, se incrementa la conciencia ciudadana en el campo de la arquitectura bioclimática acerca de las protecciones de sombra, el concepto de masa térmica y el papel jugado por la ventilación variable.

La incorporación a la oferta comercial de las primeras unidades de vidrio doble con cámara se produce comercialmente en los primeros años de la década de los 70 con la patente Thermopane. De este modo se pueden conseguir aislamientos térmicos en las ventanas que anteriormente solo podían conseguirse con dobles ventanas.

Hacia 1990, hubo un desarrollo en nuevos vidrios capaces de bloquear la radiación infrarroja, culpable del calentamiento en un espacio. Otras tecnologías, como vidrios electrocrómicos y fotocrómicos, que entran dentro del grupo vidrios denominados cromogénicos, son vistos como optimización del funcionamiento de la fachada de un edificio. Estos últimos desarrollos son prometedores, y la mayoría de ellos está en fase de investigación, por lo que habrá que esperar unos cuantos años para que un uso industrializado los haga más rentables económicamente hablando.

No es hasta el cambio climático producido en el siglo XXI, cuando comienza a haber una preocupación internacional acerca de la eficiencia energética en la arquitectura. En este punto es cuando sale a colación, el Concurso Internacional Solar Decathlon, donde universidades de todo el mundo construirán una casa que sea eficiente energéticamente, como más adelante se comentará en el punto 1.3.

#### **2.2.4. EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL VIDRIO. PARÁMETROS ÓPTICOS Y ENERGÉTICOS DEL VIDRIO**

El concepto de invernadero y las realizaciones del siglo XIX de Paxton y Turner, comentadas anteriormente, donde el control climático era algo fundamental para la conservación y crecimiento de la vegetación, dio origen a la idea de que utilizando superficies acristaladas se pueden concebir espacios donde las condiciones de clima, iluminación y en general con lo que entendemos como confort físico y psicológico, son controlables o se podían intentar controlar. El material permitía pensar en la creación y aislamiento de ambientes naturales artificialmente contruidos.

Sin embargo, cuando hablamos de confort y del material debemos considerar aspectos como: orden, diversidad, amplitud, seguridad, temperatura, humedad, iluminación, higiene y condiciones acústicas, tal y como se ha hablado anteriormente.

Los parámetros de confort son aquellas condiciones propias del lugar que inciden en las sensaciones de los ocupantes. Se sostiene que estas condiciones pueden variar con el tiempo y el espacio y, pueden clasificarse en:

Tabla 2-II. Parámetros de confort. Fuente: Acha.<sup>9</sup>

<b>Parámetros del Confort</b>		
<b>Parámetros Ambientales</b>	Temperatura del aire Humedad relativa Velocidad del aire Temperatura radiante Radiación solar Niveles de ruido	Todos tienen variabilidad temporal y espacial
<b>Parámetros Arquitectónicos</b>	Adaptabilidad del espacio Contacto visual y auditivo	

- Los parámetros ambientales son muy importantes y quizás son los que se han estudiado con mayor énfasis, ya que como pueden ser medidos se han determinado rangos y valores estándar dentro de los cuales se pueden mantener unas condiciones de bienestar para el individuo. Además, resulta evidente la influencia directa que tienen sobre las sensaciones de las personas y sobre las características físicas y ambientales de un espacio, sin ser determinante el uso y las actividades que allí se generan.
- Los parámetros arquitectónicos están directamente relacionados con las características de las edificaciones y la adaptabilidad del espacio, el contacto visual y auditivo que le permiten a sus ocupantes.

El vidrio es un material imprescindible para lograr el alcance del concepto de confort espacial, gracias a la sensación de amplitud que ofrece. Pero del mismo modo, nos surge una pregunta: ¿puede el vidrio ayudarnos al alcance del confort ambiental ideal con ahorro energético apreciable?

Actualmente, la utilización del vidrio en sus diferentes modalidades ha crecido ampliamente y tiene una importante influencia en la arquitectura, siendo su papel como superficie translúcida o transparente, un éxito. Sin embargo, ya desde los inicios de la arquitectura moderna surgieron los problemas técnicos en el uso de las superficies acristaladas de grandes dimensiones. La radiación solar con el exceso de luz y las ganancias térmicas que la acompañan, así como la falta de aislamiento térmico son los principales inconvenientes de este material.

Las bajas temperaturas de los periodos invernales evidenciaron uno de los principales problemas técnicos del vidrio, que es la falta de aislamiento térmico. La sensación de pared fría, pérdidas de calor y la condensación en su superficie son consecuencia de esta característica. Estas pérdidas de calor se producen a través de tres procesos: convección, conducción y radiación.

Para facilitar la comprensión del comportamiento del vidrio ante las distintas radiaciones se aportan algunas definiciones.

---

<sup>9</sup> (Acha, 2005)

### Radiación solar

La radiación solar está formada por una mezcla de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias. Algunas de ellas (las de longitud de onda comprendida entre  $0,4 \mu\text{m}$  y  $0,7 \mu\text{m}$ ) pueden ser detectadas por el ojo humano y constituyen la luz visible. Otras, aunque no son visibles, hacen notar igualmente sus efectos, al ceder a los cuerpos la energía que transportan.

Parte de esa radiación extraterrestre llega a la Tierra sin haber sufrido ninguna modificación en su dirección. Es la que se denomina radiación directa. El resto de radiación es absorbida o reflejada por las partículas en suspensión, los gases, el vapor de agua o las nubes que se encuentran en la atmósfera. Una parte de esta energía es devuelta al espacio y otra llega a la superficie terrestre en forma de radiación difusa. Tanto la radiación directa como la difusa cuando llegan a la superficie terrestre y a los elementos que en ella se encuentran son una fracción absorbida y otra reflejada, siendo esta última la radiación más difícil de evaluar.

La radiación global medida sobre cualquier elemento será la suma de las radiaciones directa, difusa y reflejada que inciden en él. Representa un 45 % de la radiación recibida por las capas exteriores de la atmósfera. Esta cantidad varía a lo largo del día, por la mañana la radiación solar deberá recorrer más longitud de atmósfera al ser el ángulo de incidencia más horizontal por lo que la radiación reflejada será mayor que a las horas del mediodía. Este espesor relativo de la atmósfera es determinante a la hora de conocer la radiación solar, se cuantifica con la magnitud denominada masa de aire (MA) que es la relación entre la distancia que recorre la radiación solar en un momento determinado y la que recorrería si el Sol estuviese en el cenit.

La Irradiancia es la potencia por unidad de superficie ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )

La radiación es la energía por unidad de superficie ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ )

- Extra atmosférica: Fuera de la atmósfera
- Directa: Procede del sol y depende de su posición
- Difusa: Procede de la atmósfera y es la consecuencia de los procesos de reflexión, difracción, dispersión y absorción
- Reflejada: Procede de la reflexión de la radiación incidente sobre el entorno
- Global = Directa + Difusa + Reflejada: Radiación total incidente sobre una superficie

Toda la radiación solar se convierte en calor al ser absorbida por elementos de cerramiento, tales como vidrios, carpinterías, cerramientos de fachada. Esto incluye la radiación en todos sus espectros: UVA, visible, infrarroja.

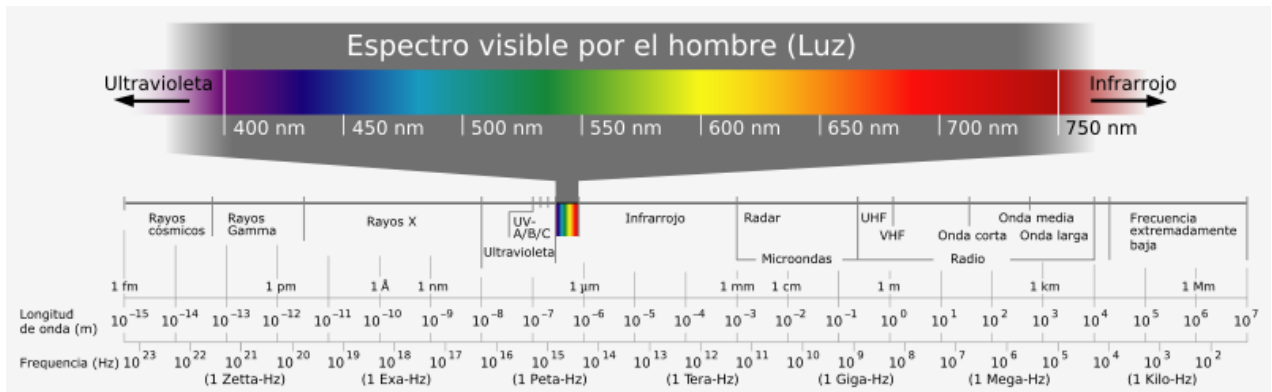


Fig. 2-15. Espectro electromagnético. Fuente: wikipedia.

**La región visible** ( $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$ ) corresponde a la radiación que puede percibir la sensibilidad del ojo humano e incluye los colores: violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo.

**La radiación de infrarrojos** o radiación térmica es un tipo de radiación electromagnética de una longitud de onda superior a la de la luz visible pero más corta que la de las microondas. Su longitud de onda, se encuentra en el rango entre los 700 nanómetros y un milímetro, es la siguiente en longitud al rojo, el color de longitud de onda más larga de la luz visible, de ahí su nombre de infrarrojo, que significa por debajo del rojo.

La radiación infrarroja se divide en:

- infrarrojo próximo cuando la longitud de onda está comprendida entre los  $0,8\mu\text{m}$  y los  $2,5 \mu\text{m}$
- infrarrojo medio cuando la longitud de onda está comprendida entre los  $2,5\mu\text{m}$  y  $50 \mu\text{m}$
- infrarrojo lejano cuando la longitud de onda está comprendida entre los  $50\mu\text{m}$  y los  $1000 \mu\text{m}$

El vidrio ordinario es transparente a la radiación infrarroja de longitud de onda más corta, más próxima a la luz visible, pero, prácticamente opaco a la radiación infrarroja de longitud de onda más larga.

**La radiación ultravioleta** es otro tipo de radiación electromagnética, en este caso de una longitud de onda inferior a la de la luz visible y significa más allá del violeta.

A efectos de clasificación, se considera la radiación ultravioleta dividida en tres franjas:

- Ultravioleta-C, altamente nociva, pero que casi nunca alcanza la superficie terrestre al ser rechazada por la atmósfera.
- Ultravioleta-B, nociva, culpable del cáncer de piel de las personas que se exponen al sol sin protección.
- Ultravioleta-A, responsable de las pecas y de que nos pongamos morenos. En dosis moderadas es beneficiosa para el organismo.



El vidrio ordinario es prácticamente opaco a los tres tipos de radiación ultravioleta. La lámina, rechaza el 99% de estas radiaciones.

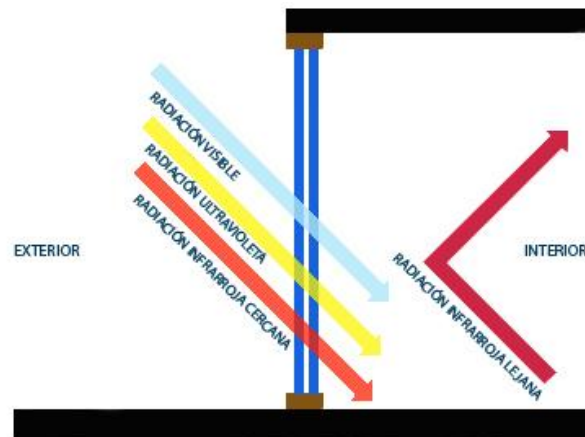


Fig. 2-16. Esquema de cómo actúa el vidrio frente a los distintos tipos de radiación.

Cuando la radiación solar incide sobre un material, parte es transmitida, absorbida y reflejada de acuerdo a diversos parámetros de la radiación solar, tales como la distribución espectral, el ángulo de incidencia, y la naturaleza del material. La Fig. siguiente, refleja, de modo esquemático, lo que sucede cuando un rayo de radiación golpea un elemento transparente, pudiendo fácilmente comprender los siguientes factores:

- Transmitancia  $\tau$ : relación entre la radiación que atraviesa un material y la radiación incidente.

$$\tau(\lambda) = \frac{I_{\text{transmitida}}(\lambda)}{I_{\text{incidente}}(\lambda)}$$

- Reflectancia  $\rho$ : relación entre la radiación reflejada del material y la radiación incidente.
- Absortancia  $\alpha$ : relación entre la radiación absorbida del material y la radiación incidente.

Existiendo siempre la siguiente relación para los tres coeficientes:

$$\tau + \rho + \alpha = 1$$

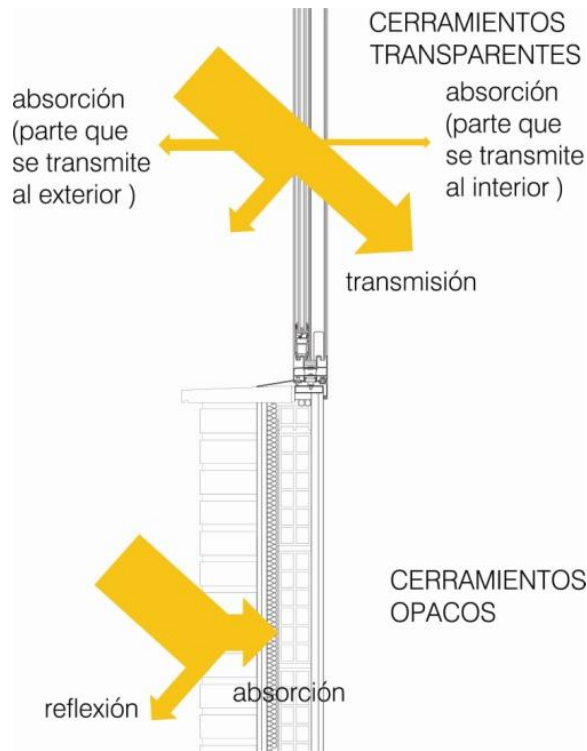


Fig. 2-17. Comparación del Flujo energético entre un cerramiento opaco y transparente.  
Fuente: Archivo Inviso.

Los valores de los parámetros ópticos varían sensiblemente en función del ángulo de incidencia. De hecho la Transmitancia mantiene valores constantes hasta ángulos en torno a 30° y comienza a disminuir hasta anularse a 90°. La Reflectancia tiene un comportamiento complementario, con un mínimo de incidencia normal a 30° y aumentando progresivamente hasta llegar a un valor 1 a los 90°. La absorción varía con el recorrido óptico de la radiación en el interior del material.

Además de los valores ópticos, es importante introducir algunos de carácter energético, los cuales son fundamentales para la elección del material y el correcto dimensionamiento y orientación de las superficies transparentes.

La figura 17 profundiza en lo ya definido anteriormente acerca de los mecanismos de la incidencia de la radiación solar sobre una superficie transparente. El esquema refleja como parte de la energía absorbida por el material viene luego rebotada sea hacia el interior que hacia el exterior, en función de las condiciones de confort interiores y aquellas medioambientales y sobretodo de las características del material. Definimos así el coeficiente  $g$ , coeficiente de transmisión total de energía solar, o comúnmente denominado factor solar, que indica la cantidad de energía globalmente transmitida a través del material, con respecto a aquella incidente.

$$g = \frac{I_t}{I} = q'_e + \tau_e$$

De la fórmula resulta evidente que el factor solar es siempre mayor que la transmitancia solar.

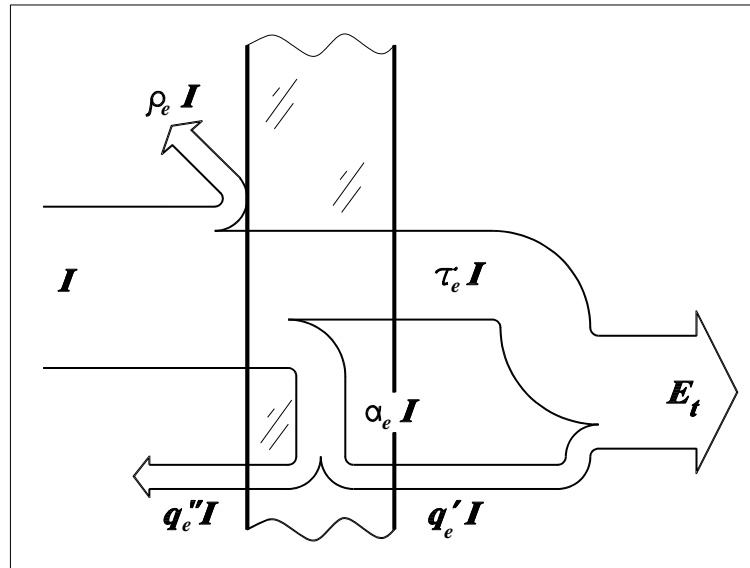


Fig. 2-18. Definición de factor solar. Fuente: Zinzi, Michele. Tesis doctoral.

Otro parámetro fundamental es la transmitancia térmica  $U$ , denominado también el coeficiente de pérdidas térmicas, definido como la cantidad de calor que un metro cuadrado de material deja pasar en la unidad de tiempo, pro cada grado de diferencia en el ambiente interior hacia el exterior. Dicho parámetro incluye las resistencias térmicas relativas a las carias capas que componen el componente transparente, además de las resistencias térmicas superficiales. La unidad de medida es  $W/m^2\text{°C}$ .

Se ha de notar que mientras el factor solar puede ser conveniente que sea alto o bajo en función de la aplicación deseada, la transmitancia térmica  $U$  tiene que ser siempre el más bajo posible. De hecho es un indicador de la capacidad del material a oponerse al flujo térmico, debido a la diferencia de temperatura, y por lo tanto, de su capacidad aislante.

**El efecto invernadero.** Los invernaderos se calientan por el efecto llamado precisamente de invernadero, en el cual puede entrar la energía solar de onda corta, pero se atrapa el calor solar absorbido que se vuelve a radiar en la forma de radiación infrarroja de onda larga, provocando el calentamiento del ambiente interior. Nos preguntamos por tanto, por qué necesitamos una trampa, como puede ser un vidrio bajo emisivo, si el vidrio común ya hace eso. La respuesta queda descrita por Amstock<sup>10</sup>. El vidrio ordinario no actúa como una trampa para la radiación. Actúa solo como una trampa de convección. Al vidrio común se le ha asociado de manera incorrecta la característica de ser una trampa de la radiación del lejano infrarrojo, porque es opaco a la radiación infrarroja de onda larga emitida por los materiales de los edificios. El vidrio pierde su transparencia a longitudes de onda más larga que las contenidas en el espectro solar, como se muestra en la gráfica 3 adjunta (el infrarrojo lejano comienza a partir de la línea roja dibujada), pero en este caso la opacidad al infrarrojo es similar al comportamiento de un cuerpo negro. El vidrio actúa como una esponja para la radiación en presencia del lejano infrarrojo vuelto a radiar. La superficie absorbe la energía de longitud de

<sup>10</sup> (Amstock, 1999). Pag 372-373.

onda corta, transformándose en infrarrojo lejano, calentándose el ambiente hasta que la energía solar entrante es igual a la energía saliente. El aire caliente también se transmite por convección hacia el vidrio, el cual también lo conduce a través de él hacia la superficie exterior.

El siguiente esquema (Fig. 2-19) explica de forma muy clara el proceso del efecto invernadero. Supongamos un recinto opaco en todas sus caras menos en una, donde se encuentra un vidrio plano sencillo. Se puede observar, como en el primero, que se encuentra a una baja temperatura, va incidiendo lentamente la radiación (visible, ultravioleta e Infrarroja cercana). En el segundo recinto, que se va calentando lentamente por efecto invernadero, la radiación infrarroja cercana, se transforma en lejana, al ser re-emitida por el resto de las superficies. Una vez que la energía entrante es igual que la saliente (recinto tres), el aire caliente de la se transmite por convección hacia el vidrio, el cual lo conduce por conducción hacia el exterior.

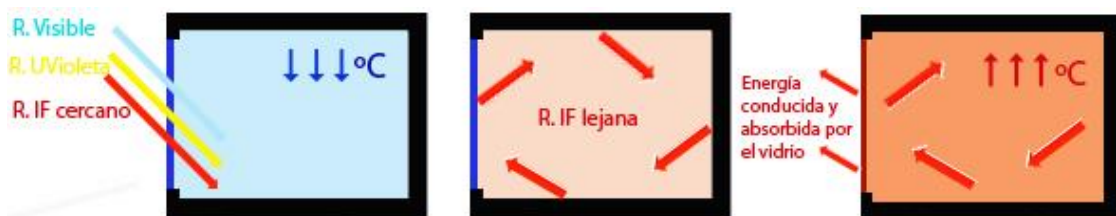
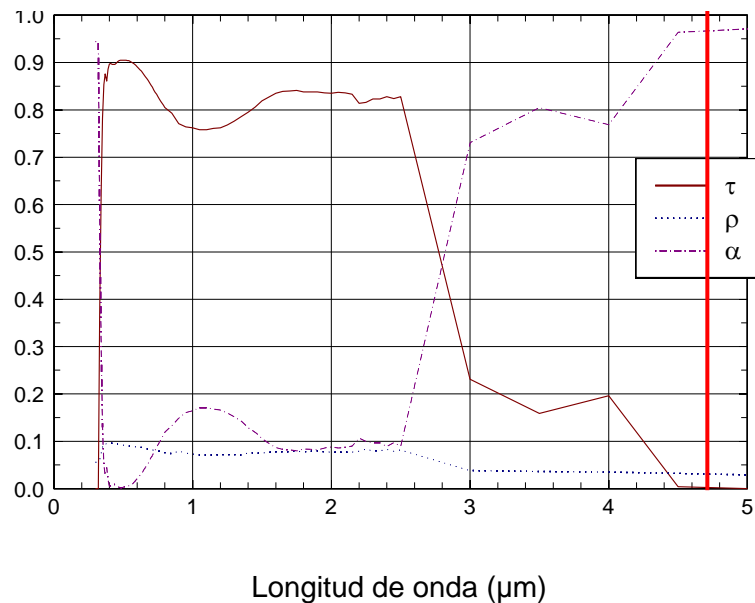


Fig. 2-19. Esquema explicativo del proceso del efecto invernadero. Fuente: archivo propio.

### COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO VIDRIO CLARO 4 MM.



Gráfica 2-2. Propiedades ópticas espectrales de un vidrio claro de 4 mm. Fuente: Tesis Michele Zinzi.

### 2.3. CASAS ENERGÍA-CERO. COMPETICIÓN E INVESTIGACIÓN: EL CONCURSO SOLAR DECATHLON.

La situación ideal desde el punto de vista energético sería conseguir la casa "Energía-cero". Se trata de edificios con un consumo de energía neta cercana a cero. En otras palabras, la energía que proviene del propio edificio mediante fuentes de energías renovables, deberá ser igual a la energía demandada por el edificio.

Demanda energía = Generación energía

Actualmente, el progreso de la tecnología podría llegar a dar con el edificio llamado "Energy Plus" o con superávit, es decir, que genera más de lo que produce. Pero, actualmente, por las dificultades inherentes a la acumulación o la venta de la energía excedente, es más realista acercarse al edificio "energía cero".

Con mejores acristalamientos se conseguiría una mejora de la eficiencia energética de la vivienda. Este es uno de los objetivos del estudio que planteamos.

Como ejemplo de casas Energía-cero, nos encontramos con la experiencia del concurso internacional Solar Decathlon. Se trata de una competición internacional, organizada por el Laboratorio de Energías Renovables (NREL) dependiente del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), en el que universidades de todo el mundo diseñan, construyen y hacen funcionar un prototipo de vivienda de unos 60m<sup>2</sup>, autosuficiente energéticamente y dotado de todas las tecnologías que permitan la máxima eficiencia energética. El Solar Decathlon, es también un evento en el que el público es invitado a observar una combinación de energía solar, eficiencia energética, y los mejores diseños de viviendas.

Se desarrolla en cuatro fases principales:

- Proyecto. Dos años antes de la fecha programada para el desarrollo del concurso se inicia el diseño y desarrollo del proyecto, definiendo cada uno de los detalles necesarios para su ejecución final, finalizando con la realización del proyecto as-built.
- Construcción: es donde se concentra la mayor fase de trabajo y aprendizaje. No solo se trata del diseño de viviendas innovadoras, sino de conseguir aunar en un solo proyecto, innovación, diseño y eficiencia energética.



Fig. 2-20. Construcción de la casa solar UPM 2007 en el NAHB. Fuente: fotografía archivo Solar Decathlon 2007.

- Traslado a la Villa Solar: 15 días antes del concurso los decathletas trasladan sus casas al National Mall en Washington D.C., y las reconstruyen en sitio.



Fig. 2-21. Imagen del mall de Washigton y montaje de la casa solar 2007. Fuente: fotografía archivo Solar Decathlon y web: [www.solardecathlon.org](http://www.solardecathlon.org)

- Competición: durante la competición en si misma, la casa es sometida a 10 pruebas donde se pone a prueba su funcionamiento.

Arquitectura, 2. Ingeniería, 3. Capacidad Comercial, 4. Comunicación, 5. Confort, 6 Funcionamiento Electrodomésticos, 7. Agua Caliente, 8. Iluminación, 9. Balance Energético, 10. Movilidad (Coche Eléctrico).



Fig. 2-22. Villa solar durante el concurso celebrado en el Mall de Washington DC. Fuente: [www.solardecathlon.org](http://www.solardecathlon.org)

Hasta el momento se han ensayado más de 70 prototipos de viviendas eficientes energéticamente. El concurso lleva ya celebrada cinco ediciones y ya está en marcha la quinta edición, la del 2011. La UPM ha participado en tres ediciones consecutivas, desde el 2005. Paralelamente a esta experiencia, la UPM, ha decidido desarrollar y organizar el Solar Decathlon Europeo, que tuvo lugar en Junio del 2010, y ya está abierto el plazo para presentar las candidaturas para el 2012.

Para la participación de la Universidad Politécnica de Madrid en el Solar Decathlon 2007, del cual se va a hacer un análisis detallado, se constituyó un equipo de profesores y alumnos liderado por el grupo de investigación TISE "Técnicas Innovadoras y Sostenibles en la Edificación" de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid y en el que también participaron alumnos y profesores procedentes del Centro de Domótica Integral (CEDINT), investigadores del Instituto de Energía Solar, así como profesores de varias Escuelas y Grupos de Investigación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Hasta el momento no se sabe de ninguna otra experiencia similar a este acontecimiento bianual, ya que da la oportunidad de ensayar cada dos años unos 20 prototipos de viviendas eficientes energéticamente, realizados por universidades de todo el mundo. Se trata por tanto de una experiencia única en la historia de la investigación arquitectónica, y en la que la UPM está teniendo la posibilidad, no solo de experimentar esta experiencia, sino ahora de poder organizarla.

Se puede definir prototipo como "ejemplar de investigación". Las pruebas desarrolladas en el ya definido concurso del Solar Decathlon, miden prestaciones y se publican sus resultados. Estos datos pueden ser tomados en cuenta para futuras investigaciones y experimentaciones realizadas.

En 2002 fueron catorce las universidades las que participaron, todas ellas americanas. Por primera vez tuvieron oportunidad de experimentar el formidable esfuerzo técnico que requiere una empresa de este tipo. Hay que construir, transportar y ensamblar la casa en destino en plazos muy estrictos (una semana), debiendo funcionar todo correctamente con máxima precisión. El desarrollo de la competición tiene lugar en el Mall de Washington DC (EEUU), durante septiembre-octubre, teniendo una duración de una semana. A continuación, tiene lugar el desmontaje (3 días), para volver a desmontar pieza a pieza cada uno de los prototipos y llevarlos a su lugar de destino.



Fig. 2-23. Desmontaje del prototipo del 2007, en el mal de Washington. Fotografía de archivo Solar Decathlon

En 2005 la única universidad europea participante fue la UPM, con su "Magic Box". Tuvo la dificultad añadida, con respecto al resto de universidades americanas, de tener que cruzar el Atlántico.

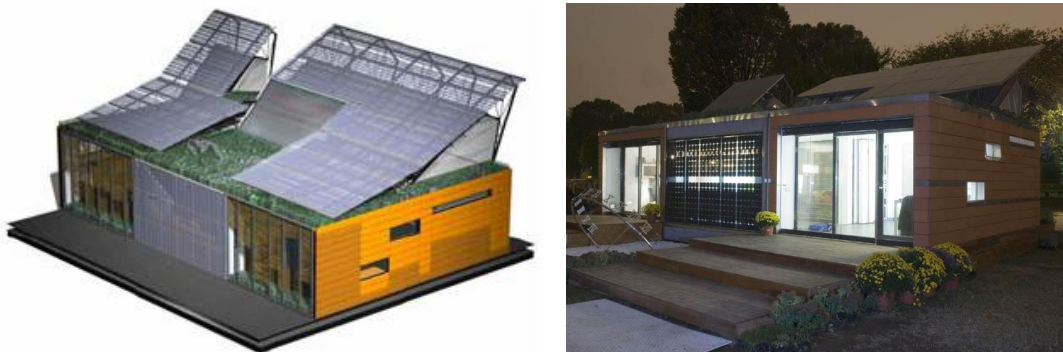


Fig. 2-24. Magic Box. Prototipo presentado por la UPM al Solar Decathlon 2005. Fuente: archivo Solar Decathlon y [www.solardecathlon.org](http://www.solardecathlon.org)

En el 2007, la UPM, que volvió a ser seleccionada para el concurso, no fue la única competidora de Europa, sino que también fue seleccionada la Technische Universität Darmstadt, quedando finalmente en primer lugar, y la UPM en el quinto puesto.





Fig. 2-25. Technische Universität Darmstadt. Universidad ganadora SD 2007. Fuente: [www.solardecathlon.org](http://www.solardecathlon.org)

### 2.3.1. DESCRIPCIÓN DE LA CASA SOLAR UPM-2007

El equipo de la UPM realizó un anteproyecto revolucionario, que a pesar de no haber visto la luz en el concurso, sirvió de inspiración a la propuesta definitiva que obtuvo excelentes resultados. Esta propuesta inicial se llamó "White Wing". Para ello, el equipo del Solar Decathlon 07, de la UPM, compuesto por profesores, doctorandos y alumnos de grado de la ETSAM, realizó un primer prototipo, para la participación del Concurso y fue objeto del anteproyecto enviado a Washington como primera entrega del proyecto. La propuesta consistía en un volumen prismático totalmente acristalado, bajo una cubierta en voladizo (Fig. 2-26).

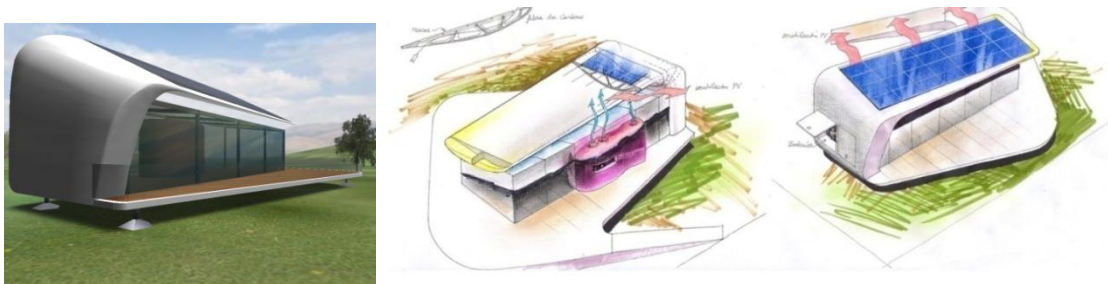


Fig. 2-26. Anteproyecto rechazado White Wing. Fuente: imagen de archivo grupo Solar Decathlon 07.

La contradicción inicial que pudiera existir por el hecho de haber planteado una "caja de cristal" como prototipo de vivienda sostenible, se solucionaría recurriendo a las técnicas pasivas de bioclimatismo, junto con la ayuda de nuevas tecnologías existentes actualmente en el mercado, como la utilización de vidrios dinámicos, capaces de cambiar sus cualidades ópticas de transmisión y absorción de la radiación solar, contando con la ayuda de la domótica en todo momento, para el mantenimiento de unas medidas internas de confort agradables con un elevado ahorro energético.

El prototipo final que desarrolló, construyó y presentó la Universidad Politécnica de Madrid es una vivienda unifamiliar industrializable que tiene como objetivo conseguir la completa autosuficiencia energética en el ciclo anual. El programa y superficie se adaptan a los requisitos del Concurso Solar Decathlon en el que participa la casa, así como la necesidad de dar energía a un coche eléctrico. La energía es producida a través de placas fotovoltaicas situadas en la cubierta orientada a Sur, con una inclinación de 40º, óptima para el mes Octubre.

El diseño del prototipo fue el resultado de unificar tecnología, arquitectura bioclimática y confort. Es decir, la casa incorpora la tecnología existente en el momento, aprovecha los beneficios del entorno en el que se sitúa, y contempla la habitabilidad como objetivo imprescindible.

La configuración general consiste en un volumen prismático con orientación principal norte-sur, para aprovechar y controlar la radiación solar, con un cerramiento multicapa con niveles de aislamiento excepcionales y con aperturas intencionadamente dimensionadas y situadas en función de su orientación y prestaciones tecnológicas.

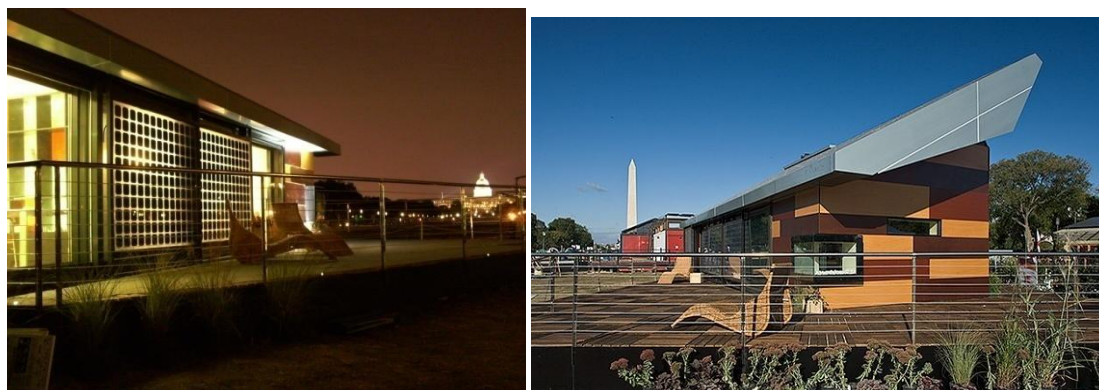


Fig. 2-27. Fotografías del prototipo final presentado por la UPM. Fotografía de archivo

Otro aspecto importante fue la incorporación de múltiples estrategias bioclimáticas, entre las que se encuentra la optimización de las superficies acristaladas de grandes dimensiones, avanzando hacia las dobles pieles inteligentes.

Se realizó durante el desarrollo del concurso un primer estudio de ventilación, viendo como la doble piel integrada una vez en la vivienda ayudaría al precalentamiento o enfriamiento de la casa según las condiciones exteriores climáticas. Los esquemas a continuación expresan los flujos de ventilación del prototipo tanto en invierno como en verano.

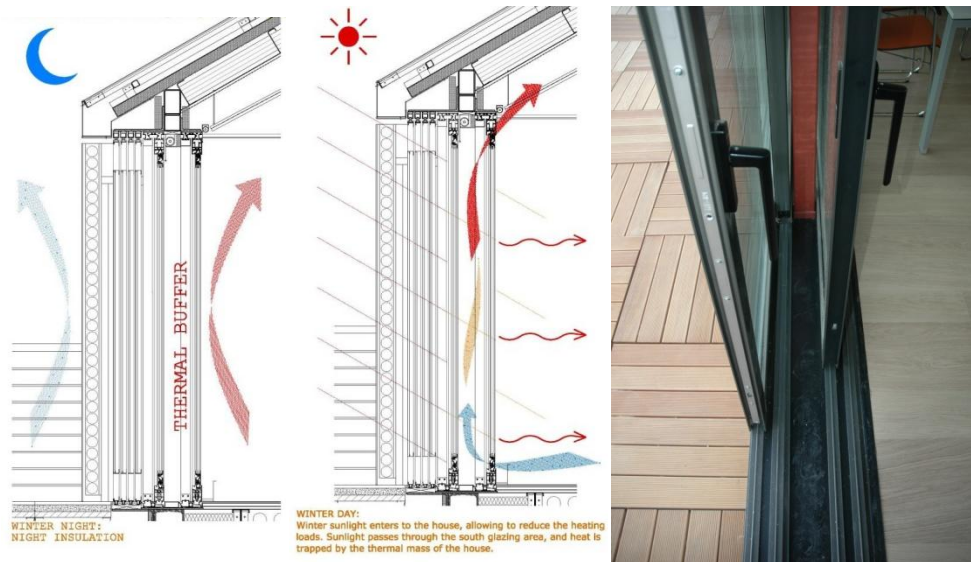
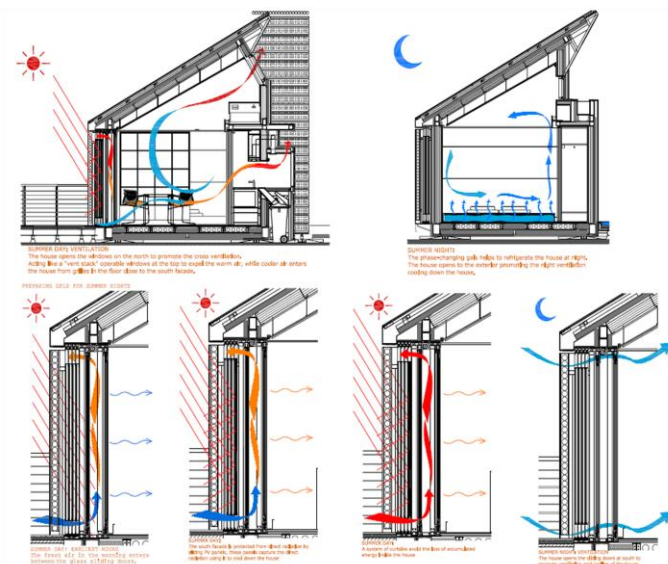


Fig. 2-28. Estudio de la fachada de doble piel de aire. Fuente: Archivo propio SD 07.

**VERANO**



**Verano. Horas de sol**

Ventilación cruzada.  
Apertura de rejillas exteriores para enfriar el aire de la cámara en la madrugada.  
Protección: puertas corredera fotovoltaicas y cortinas.

**Verano. Noche.**

Apertura de rejillas para ventilación y refrigeración de la vivienda.

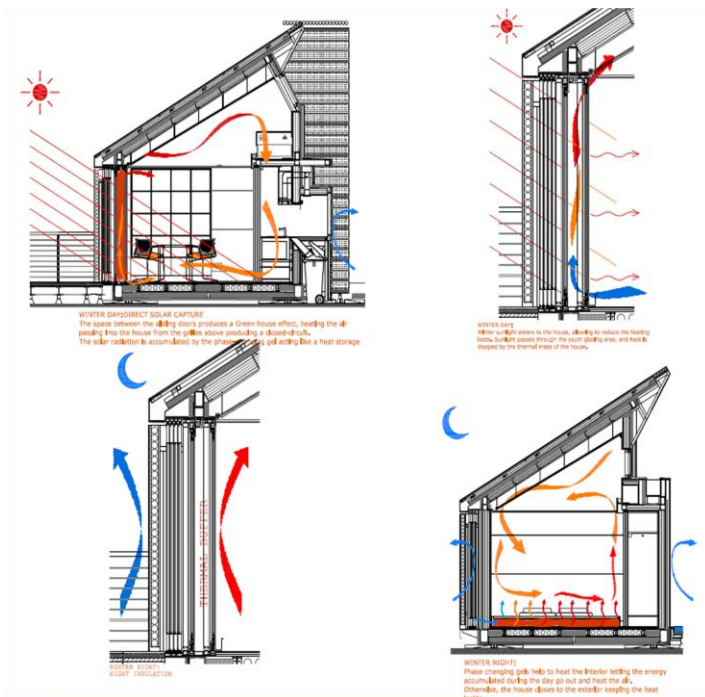
Fig. 2-29. Estudio de la fachada de doble piel de aire. Fuente: Archivo propio SD 07.

En las primeras horas de la mañana, mediante la apertura de las rejillas de la piel exterior tanto superiores como inferiores, el aire fresco ventilaría la cámara, permitiendo el aire caliente su salida por la rejilla exterior superior. El frío acumulado, pasaría por conducción al interior de la vivienda.

Una vez avanzado el día, cuando la temperatura comienza a subir, se correrían las puertas correderas fotovoltaicas, para impedir que la radiación solar penetre. Seguimos manteniendo las rejillas abiertas, para evitar un excesivo sobrecalentamiento.

En la noche, apertura de las rejillas tanto exteriores como interiores, para permitir la ventilación y refrigeración de la vivienda con el aire fresco nocturno.

## INVIERNO



### **Invierno. Horas de sol.**

El espacio entre las puertas correderas, calienta el aire, que cerrando las rejillas exteriores y abriendo las interiores, calentaría el interior de la vivienda.

### **Invierno. Noche.**

Circuito cerrado que mantiene el calor en el interior de la vivienda.

Fig. 2-30. Estudio de la fachada de doble piel de aire. Fuente: Archivo propio SD 07.

Desde las primeras horas de la mañana, manteniendo cerradas tanto las rejillas aireadoras tanto exteriores como interiores, el aire atrapado en el interior de la cámara es precalentado por la acción de la radiación solar.

Ya en la tarde-noche, una vez calentado, calentaríamos la vivienda de dos modos:

(1) por conducción: el calor almacenado en la cámara pasaría por conducción a través del vidrio al interior de la vivienda. El vidrio bajo emisivo colocado en capa 2, evitarían las pérdidas hacia el exterior.

(2) por convección: abriendo las rejillas interiores, y manteniendo cerradas las exteriores, el aire calentado, es introducido en la vivienda por las rejillas superiores, debido a la presión excesiva creada en esa zona. Al mismo tiempo, el aire más frío de la vivienda, más denso y acumulada en la parte baja, tendería a entrar en la cámara por presión excesiva. Ese aire volvería a calentarse, para volver de nuevo ascender y completar el ciclo.

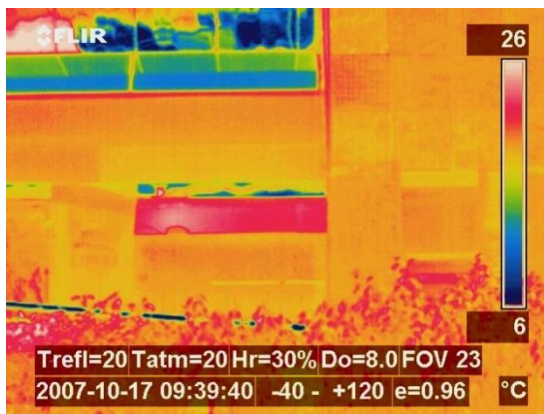
Durante las horas nocturnas, el sol ya se ha ido, y la temperatura empieza descender drásticamente. Crearíamos entonces un Circuito cerrado que mantendría el calor en el interior de la vivienda. Las rejillas exteriores permanecerían también cerradas para impedir que ese aire frío volviese a entrar. La capa bajo emisiva del vidrio, impediría la salida del calor interior acumulado.<sup>11</sup>

Para mayor información de la casa solar 2007, montaje, desmontaje, y planos principales, ver Anexo 7- Solar Decathlon.

<sup>11</sup> Estudio teórico de la doble piel realizado junto al resto del equipo de arquitectura UPM-Solar Decathlon 2007.

### 2.3.2. PRESTACIONES DEL CERRAMIENTO ACRISTALADO DE LAS CASAS SOLAR DECATHLON 2007

La combinación de un buen diseño y estudio conforme a los principios de la arquitectura bioclimática, el buen comportamiento térmico, tanto de los cerramientos multicapas ligeros empleados, como de las carpinterías y dobles pieles, como anteriormente se ha explicado, unido a la gran capacidad de generación eléctrica del prototipo, y a la estrategia desarrollada durante la competición SOLAR DECATHLON 2007, hicieron que el prototipo SD7 diseñado por la UPM obtuviese la primera posición de la Competición respecto al Balance Energético, una de las pruebas claves de la competición. Las siguientes imágenes termográficas tomadas por el equipo Solar Decathlon 2007 UPM, muestran el buen comportamiento de la vivienda. Se observa cómo en fachada sur, el uso de la doble en fachada sur, mantiene una temperatura de aproximadamente unos 20°C en zonas altas, donde en zonas superiores el aire es más cálido, confirmado el estudio teórico realizado anteriormente.



Fachada Norte del prototipo SD7



Fachada Sur del prototipo SD7

Fig. 2-31. Imágenes termográficas de la fachadas Norte y Sur. Fotografías de archivo SD7.

Todas las casas fueron monitorizadas bajo un plan de monitorización realizada por el DOE. (Ver anexo 7: Solar Decathlon. Instrucciones de monitorización de la casa), que complementaba en todo momento a la realizada individualmente por cada universidad. Se estima por tanto de primordial importancia para el presente estudio el análisis del comportamiento térmico y energético de las casas del Solar Decathlon 2007, a partir de dicho estudio.

Para ello se analizarán dos de las 10 pruebas que se compone el concurso, mencionadas anteriormente: Condiciones de bienestar (Comfort Zone) y Balance Energético (Energy Balance), pasándolas a describir brevemente a continuación.

#### **Condiciones de bienestar (Comfort Zone):**

*Los equipos del Solar Decathlon diseñan sus casas con el fin de mantener una temperatura fija, uniforme y confortable. La puntuación completa para*

*esta prueba se asignará a los equipos que logren mantener una temperatura entre 22,2 y 24,4°C, y una humedad relativa entre el 40-55%.<sup>12</sup>*

Para su análisis se tendrán en cuenta el número de veces que cada universidad se mantiene en el rango de la temperatura y humedad establecidas, durante las 4 noches de la competición, desde las 19 horas a las 7 de la mañana.

### **Balance energético (Energy Balance):**

*La prueba de Balance energético requiere que los equipos usen solo la energía generada por los sistemas solar eléctrico (también llamada sistema fotovoltaico) en sus casas para proveer toda la electricidad necesaria para las pruebas. Los equipos logran la máxima puntuación si la energía suministrada a las baterías es al menos la energía consumida durante toda la competición.<sup>13</sup>*

Para el estudio de las prestaciones energéticas de las casas solares se ha realizado primeramente una tabla (ver tabla 3), a partir de los análisis de las pruebas de condiciones de bienestar y de balance energético, pero estimando únicamente el periodo nocturno y desestimando el resto del día.<sup>14</sup>

Para la realización del análisis se ha contado el número de "aciertos" o "cumplimientos" totales que cada una de las casas, a cada hora, lograba mantener la temperatura y la humedad en el rango establecido por las reglas del concurso en la prueba de *comfort zone* durante la noche, en cada uno de los días del concurso, tal y como se puede ver en la tabla 3. La tabla está dividida en 20 filas, donde encontramos las 20 universidades participantes, y en 9 columnas, que pasaremos a describir a continuación. Los valores numéricos de las 5 primeras columnas corresponden al análisis de la prueba de condiciones de bienestar, analizando cada día de la semana que duró el concurso desde las 19h hasta las 7 de la mañana, el número de veces que la universidad está en el rango establecido por las reglas del concurso, tanto en temperatura como en humedad, analizando en la quinta columna el número de aciertos totales. La siguiente columna de la tabla (balance energético total) expresa el balance energético, es decir, el resultado de restar la energía consumida de la energía producida. Durante la noche la producción es nula, por lo que los datos salen siempre negativos, correspondientes únicamente a la energía consumida, como se puede observar en la hoja de cálculo resumen. Considerando que la carga de las baterías del coche eléctrico (prueba de movilidad) solo puede ocurrir entre las 19.00h y las 00.00h, se descarta dicha franja horaria, para considerar solamente el resto de los consumos desde las 00.00h de la noche hasta las 10.00h de la mañana. La siguiente columna expresa la clasificación global en la prueba de condiciones de bienestar final del concurso, (periodo diurno y nocturno) con el fin de compararla con la siguiente columna, la clasificación nocturna según nuestro análisis. Por último, la última columna expresa la división

---

<sup>12</sup> Traducido de: [www.solardecathlon.org](http://www.solardecathlon.org). Para ampliación ver en anexo reglas del solar decathlon 2007

<sup>13</sup> Traducido de: [www.solardecathlon.org](http://www.solardecathlon.org). Para ampliación ver en anexo reglas del Solar Decathlon 2007

<sup>14</sup> Datos obtenidos de la monitorización de las casas para el Solar Decathlon realizada por la organización. Hoja de cálculo resumen:

[http://www.solardecathlon.gov/past/2007/final\\_results.cfm](http://www.solardecathlon.gov/past/2007/final_results.cfm)

entre el número de cumplimientos y el balance energético, con el fin de obtener las 5 mejores universidades (en rojo) que tuvieron unas condiciones de confort estables durante la noche, pero con un bajo consumo energético.

Tabla 2-III. Análisis Confort Zone de todas las universidades participantes en Solar Decathlon 2007.

ANÁLISIS UNIVERSIDADES SOLAR DECATHLON 2007										
CUMPLIMIENTO CONDICIONES DE CONFORT/BALANCE ENERGÉTICO DURANTE LAS NOCHES										
UNIVERSIDAD		LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	TOTAL	BALANCE ENERGÉTICO TOTAL Kw/h	CLASIFICACIÓN GLOBAL PRUEBA CONFORT ZONE	CLASIFICACIÓN EN NOCHES	Nº CUMPLIMIENTOS / BALANCE ENERGÉTICO
Santa Clara	Temperatura	12	13	9	2	36	-3,23	5	1	-11,16
	Humedad	13	13	10	0	36			4	-11,16
Darmstadt	Temperatura	5	10	10	0	25	-4,01	10	8	-6,23
	Humedad	12	13	11	0	36			5	-8,97
Maryland	Temperatura	5	13	5	0	23	-2,74	4	10	-8,40
	Humedad	12	13	10	0	35			4	-12,79
Penn State	Temperatura	10	13	5	1	29	-2,10	13	3	-13,80
	Humedad	12	13	1	0	26			15	-12,37
Colorado	Temperatura	7	8	9	0	24	-2,43	19	9	-9,87
	Humedad	12	8	2	0	22			17	-9,05
Missouri-Rolla	Temperatura	10	6	4	1	21	-2,57	6	14	-8,18
	Humedad	9	3	8	0	20			18	-7,79
Georgia Tech	Temperatura	13	6	4	0	23	-3,73	15	11	-6,16
	Humedad	13	13	13	0	39			2	-10,44
Madrid	Temperatura	10	12	2	2	26	-1,57	7	5	-16,53
	Humedad	13	13	4	0	30			9	-19,08
Illinois	Temperatura	13	11	7	0	31	-2,14	1	2	-14,51
	Humedad	13	13	13	0	39			1	-18,26
Montreal	Temperatura	7	11	5	3	26	-3,08	2	6	-8,44
	Humedad	13	10	7	0	30			10	-9,74
MIT	Temperatura	5	3	7	11	26	-2,33	14	7	-11,14
	Humedad	8	0	1	0	9			20	-3,86
Texas at Austin	Temperatura	3	2	8	1	14	-3,66	3	19	-3,83
	Humedad	12	13	9	0	34			7	-9,30
Carnegie Mellon	Temperatura	10	6	3	1	20	-1,69	11	15	-11,85
	Humedad	13	12	5	0	30			11	-17,77
NYIT	Temperatura	10	4	3	5	22	-2,70	8	12	-8,15
	Humedad	13	10	10	0	33			8	-12,22
Puerto Rico	Temperatura	1	8	7	13	29	-5,80	18	4	-5,00
	Humedad	4	8	0	0	12			19	-2,07
Texas A&M	Temperatura	7	7	1	1	16	-5,34	9	17	-2,99
	Humedad	10	7	12	0	29			12	-5,43
Cincinnati	Temperatura	3	3	0	0	6	-1,44	20	20	-4,18
	Humedad	4	12	12	0	28			14	-19,51
Kansas	Temperatura	7	6	6	1	20	-2,51	16	16	-7,98
	Humedad	13	13	1	1	28			13	-11,17
Cornell	Temperatura	5	4	13	0	22	-4,80	12	13	-4,58
	Humedad	12	13	12	0	37			3	-7,70
Lawrence Tech	Temperatura	8	8	0	0	16	-3,30	17	18	-4,85
	Humedad	11	11	2	0	24			16	-7,27

Las universidades que han dado un mejor comportamiento (marcadas en rojo en tabla 3) son: Santa Clara, Penn State, Madrid, Illinois, Carnegie Melon.

Con el fin de aislar los eventuales consumos de climatización, que son los que nos interesan, se han restado los otros consumos de aquellos equipos que se consideran que están encendidos durante la noche:

- Frigorífico: 600W
- Sistema de detección de humos: 20W

Se ha realizado una nueva tabla (Tabla 2-IV) con el fin de observar el consumo generado por cada una de las 5 mejores universidades seleccionadas de la tabla 3 entre las 00.00h y las 10.00h. Dicha tabla está dividida en 5 filas que corresponden a las 5 mejores universidades, y en 4 columnas, pertenecientes a las cuatro días de la semana durante el concurso che hubo mediciones completas, en los que se expresa el consumo total durante las 00.00h y las 10.00h y el número de "aciertos" en que la casa está en el rango de temperatura que marcaban las reglas.

Por tanto sumando ambos consumos, se puede establecer que a partir de 0.7 kWh se considera que ha habido consumo de climatización.

Tabla 2-IV. Análisis de consumos nocturnos de las 5 mejores universidades participantes en Solar Decathlon 2007 a partir de la tabla 2-III.

UNIVERSIDAD		LUNES	MARTES	MIERCOLES	JUEVES
<b>Santa Clara</b>	CONSUMO kWh	-0,85	-1,07	-0,8	-0,4
	ACIERTOS TEMPERATURA	12	13	9	2
<b>Penn State</b>	CONSUMO kWh	-0,7	-0,7	-0,2	-0,3
	ACIERTOS TEMPERATURA	10	13	5	1
<b>Madrid</b>	CONSUMO kWh	-0,47	-0,25	-0,22	-0,62
	ACIERTOS TEMPERATURA	10	12	2	2
<b>Illinois</b>	CONSUMO kWh	-0,4	-0,7	-0,8	-0,15
	ACIERTOS TEMPERATURA	13	11	7	0
<b>Carnegie Mellon</b>	CONSUMO kWh	-0,97	-0,27	-0,18	-0,24
	ACIERTOS TEMPERATURA	10	6	3	1

A partir de aquí, cabe preguntarse si hay alguna construcción que pueda mantener mejor la temperatura, pero con el mínimo coste energético, es decir, que envolvente es la más eficiente.

Nos queda un solo estudio. El análisis de los tipos de vidrio utilizado por cada una de las universidades, tal y como indica la tabla 5, así como la superficie acristalada de cada uno de los tipos divididos por orientaciones.



La tabla 2-V ha sido dividida en 5 columnas que expresan las 5 mejores universidades seleccionadas del análisis de la tabla 3, en 6 columnas, donde explica el tipo de vidrio utilizado y sus características en las distintas orientaciones, y el % de superficie acristaladas con respecto a la opaca.

Tabla 2-V. Análisis vidrios universidades seleccionadas Solar Decathlon 2007

<b>ANÁLISIS UNIVERSIDADES SOLAR DECATHLON 2007</b>							
<b>CUMPLIMIENTO CONFORT ZONE DURANTE LAS NOCHES</b>							
<b>UNIVERSIDAD</b>	<b>% superficie/ Factor U (W/m<sup>2</sup> K)</b>	<b>Tipo vidrio Norte</b>	<b>Tipo vidrio Sur</b>	<b>Tipo vidrio Este</b>	<b>Tipo vidrio Oeste</b>	<b>% Sup acristalada</b>	<b>% Sup Opaca</b>
<b>Santa Clara</b>	Tipo	Doble vidrio y capa bajo emisiva.	Nana Wall: Puerta corredera doble vidrio low-e/Vidrio de partículas en suspensión.	Vidrio de Partículas en suspensión.	Vidrio de Partículas en suspensión.	<b>12,00</b>	<b>88,00</b>
	%	6,34%	72%	13,40%	8,26%		
	Factor U	1,87374	1,47628	1,58984	1,58984		
<b>Penn State</b>	Tipo	Triple vidrio con capa bajo emisiva y 2 cámaras de argón/ 16 mm Nanogel 10 mm color ópalo.	Doble vidrio con capa bajo emisiva y cámara de argón/ Triple vidrio con capa bajo emisiva y 2 cámaras de argón.	Doble vidrio con capa bajo emisiva y cámara de argón/ Triple vidrio con capa bajo emisiva y 2 cámaras de argón. / 16 mm Nanogel 10 mm color ópalo.	Doble vidrio con capa bajo emisiva y cámara de argón/ Triple vidrio con capa bajo emisiva y 2 cámaras de argón. / 16 mm Nanogel 10 mm color ópalo.	<b>31,10</b>	<b>68,90</b>
	%	27,70%	33,54%	20,30%	18,21%		
	Factor U	0,732 / 0,88	1,41 / 0,72	1,41 / 0,72 / 0,88	1,41 / 0,72 / 0,88		
<b>Madrid</b>	Tipo	6/12/5 bajo emisivo cara 3 y cámara de argón.	Puerta corredera doble piel 3+3/12/5/19 0/5/12/3+3. Capa bajo emisiva en cara 2	Vidrio doble 6/12/5 y cámara de aire.	Vidrio doble 6/12/5 y cámara de aire.	<b>25,00</b>	<b>75,00</b>
	%	23,75%	69,09%	6,07%	1%		
	Factor U	1,37	1,29	1,37	1,37		

<b>Illinois</b>	Tipo	Doble vidrio con cámara de argón y vidrio aislante 6mm. 6/13/6	Doble vidrio con cámara de argón y vidrio aislante 6mm. 6/13/6 Puertas abatibles de triple vidrio aislante y doble cámara de argón: 3/3/3/3/3	Doble vidrio con cámara de argón y vidrio aislante 6mm. 6/13/6	Doble vidrio con cámara de argón y vidrio aislante 6mm. 6/13/6	<b>15,63</b>	<b>84,36</b>
	%	12,27%	50%	35,98%	1,75%		
	Factor U	1,58	1,58 / 1,47	1,58	1,58		
<b>Carnegie Mellon</b>	Tipo	6/13/6, Templado y capa de control solar en cara 2. Cámara de argón.	6/13/6, Templado y capa de control solar en cara 2. Cámara de argón.	6/13/6, Templado y capa de control solar en cara 2. Cámara de argón.	—	<b>9,22</b>	<b>90,78</b>
	%	29,28%	60%	10,72%			
	Factor U	1,4195	1,9873	1,81696			

A continuación pasemos a analizar cada una de las mejores universidades:

Santa Clara: tiene una baja superficie acristalada. Un 12% frente al 88% de superficie opaca. Destaca el uso de vidrios dinámicos (partículas en suspensión) en orientaciones Este y Oeste con el fin de protegerse y evitar el sobrecalentamiento ocasionada por la entrada de radiación directa en dichas orientaciones. En orientaciones Norte y Sur, destaca el uso de bajos emisivos, con un U de 1,8, bastante elevado, por lo que se estiman pérdidas.

Quedando los quintos en la prueba de Comfort Zone en el concurso, tuvo el mejor comportamiento durante las noches. Observando el consumo en la tabla 4, se observa que ha encendido el sistema de climatización durante todas las noches del concurso para mantenerse en los rangos de confort establecidos.

Penn State: tiene la mayor superficie acristalada de todas las universidades seleccionadas, con un 31%. Destaca el uso del aerogel en todas las orientaciones excepto la sur, para evitar la captación en dichas orientaciones, con un bajo coeficiente de transmisión ( $U \approx 0.88$ ), y uso de vidrios bajo emisivos en sur para evitar las pérdidas y tener captación. A pesar de tener un bajo consumo energético todas las noches, mantuvo un confort muy ajustado a lo designado en las reglas del concurso. Es de mencionar el hecho de que quedaron en posición 13 la prueba de condiciones de bienestar, una posición bastante mala, si lo comparamos con su estupendo comportamiento nocturno. Si analizamos las temperaturas alcanzadas, tanto durante el día y durante la noche, no estuvieron exactamente en el confort mencionado por las reglas, pero la distorsión no es superior a 1,5°C, perjudicándole este hecho frente a otros equipos.

Según la tabla 2-IV, consiguió mantener el confort las dos primeras noches debido a la utilización del sistema de aire acondicionado.

Madrid: tiene la segunda mayor superficie acristalada: un 25% y una posición nº 7 en la prueba de confort. Destaca por su buen comportamiento térmico nocturno, a pesar de su bajo consumo energético (salvo la noche del tercer día que mantuvo encendido el sistema de climatización). Los vidrios utilizados son bajo emisivos con un coeficiente de transmisión medio 1,37 en orientaciones Norte, Este y Oeste. Adoptó la opción de una doble piel en orientación sur, y poder jugar no solo con la captación, sino con el juego de los flujos de aire frío y caliente, día y noche, como se ha explicado anteriormente.

Tuvo un muy buen comportamiento nocturno las dos primeras noches, frente a una posición en el concurso en la prueba de 7. Tiene muy buen comportamiento energético con un uso muy bajo (salvo la última noche) del sistema de climatización. Indica un buen comportamiento térmico de la casa, con pocas pérdidas.

Illinois: tiene una baja superficie acristalada: un 15% con respecto a la superficie total del edificio, y posición número 1 en la prueba de confort. Destaca con por su buen comportamiento térmico a pesar del bajo consumo energético nocturno, tal y como se observa en la tabla 4. Los vidrios utilizados son bajo emisivos con cámara de argón con un coeficiente de transmisión medio de 1,47. Destaca el uso, como Madrid, de las cualidades de la doble piel en orientación Sur.

Nº 1 en la prueba de condiciones de bienestar, teniendo un muy buen comportamiento térmico durante la noche los tres primeros días con un bajo consumo energético, encendiendo posiblemente el sistema de climatización algunas horas. Indica por tanto un buen comportamiento térmico de la casa, con pocas pérdidas.

Carnegie Mellon: tiene la menor superficie acristalada de las 5 universidades seleccionadas, y posición nº 11 en la prueba de confort. Destaca por su buen comportamiento térmico durante la primera noche, y regular el resto de las noches, por mantener apagado el sistema de climatización. Los vidrios utilizados son de control solar con cámara de argón, destacando la ausencia de superficie acristalada en orientación Oeste, para evitar un sobrecalentamiento por la tarde. Los vidrios se caracterizan por su alto coeficiente de transmisión, por lo que tienen pérdidas (1.4-1.9). Su comportamiento térmico, a nivel medio, es debido a su reducida superficie acristalada, para evitar pérdidas.

Nº 11 en la prueba de confort, tiene un buen comportamiento térmico durante la primera noche, en la que se observa que encendió el sistema de climatización. El resto de las noches baja su comportamiento, al no poder encender el sistema. Índice que tiene pérdidas durante la noche.

Enumeramos a continuación las estrategias utilizadas por las universidades:

- Reducción de la superficie acristalada para evitar pérdidas (Santa Clara, Illinois, Carnegie Mellon).

- Uso de vidrios dinámicos o especiales (Penn State con el uso del aerogel, y Santa Clara con vidrios cromogénicos).
- Uso de estrategias pasivas, como una doble piel de vidrio (Madrid).

En consecuencia podemos extraer las siguientes conclusiones:

Dificultad a priori de obtener lecturas directas sobre la eficiencia energética de la envolvente.

- Todas las casas usan vidrios bajo emisivos para evitar las pérdidas nocturnas. Lógicamente, aquellas con un coeficiente de transmisión más bajo tienen menos pérdidas, y como se ha observado en el comportamiento de las casas analizadas no por tener una baja superficie acristalada, obtienen mejores resultados que aquellas con una mayor superficie.
- Una superficie acristalada elevada, permite una alta captación solar en Sur. Con un buen aislamiento, vidrios bajo emisivos y con la introducción en la cámara gases inertes, y el uso de cortinas aislantes durante la noche evitan pérdidas mayores.
- Como se ha observado, el uso, de aerogel o de otros elementos con un bajo coeficiente de transmisión, tiene un mejor comportamiento nocturno con respecto a otras casas.
- Finalmente, observar que se han usado estrategias dispersas como prueba la falta de unanimidad sobre la mejor solución o la más efectiva.

#### **2.4. EL VIDRIO EN LA EDIFICACIÓN. MEJORAS EN SU EFICIENCIA: DOBLE PIEL, VIDRIOS ESTÁTICOS Y DINÁMICOS.**

Uno de los objetivos más importantes en los edificios es su adecuación a las condiciones medioambientales, con el fin de optimizar el comportamiento energético y el confort térmico y visual de los ocupantes. Esta cuestión es relevante, por ejemplo, en los edificios públicos, generalmente en aquellos que incorporan grandes superficies acristaladas, donde el sobrecalentamiento y la falta de confort térmico y visual son comunes, especialmente en latitudes mediterráneas, como en España.

Como se ha comentado, la causa más importante del aumento de las cargas de aire acondicionado, entre otras, es la radiación solar directa sobre las superficies transparentes. Para eliminar este problema, se deben usar protecciones solares, observando de este modo los efectos negativos de la ausencia de la radiación solar en las cargas energéticas.

No podemos dejar de lado, igualmente, las grandes pérdidas que se originan por las superficies acristaladas, generalmente durante las noches. Los materiales cromogénicos pueden proporcionar al edificio una mejora del comportamiento energético, y evitar la falta de confort producida por las protecciones solares, al cambiar sus propiedades ópticas y solares (transmitancia luminosa y factor solar), aunque su comportamiento no sería tan eficaz, en principio, para evitar las

pérdidas. El estudio de las características, de éstos tipos de vidrios y el análisis de otros, dentro del grupo de los dinámicos, nos permitirán averiguar qué tipo de vidrio es más eficiente frente a las pérdidas y las ganancias.

El primer punto que hay que afrontar, tratándose de los materiales transparentes novedosos es de establecer cuales lo son efectivamente. Se consideran novedosos aquellos materiales en fase de estudio experimental o de reciente introducción en el mercado, como son los vidrios dinámicos y algunos vidrios estáticos como pueden ser los vidrios al vacío entre otros. Por otro lado existen categorías de materiales aislantes y/o bajo-emisivos, que aunque ya están en el comercio desde hace años, tienen prestaciones ópticas notablemente mayores que los vidrios tradicionales. Esta consideración es la que hace incluir en este capítulo todos aquellos elementos transparentes cuyas características ópticas y térmicas difieren del vidrio simple o del doble acristalamiento común.

Por tanto, las claras diferencias que podemos encontrar de estos nuevos productos en comparación con el vidrio simple o con cámara de aire es por:

- Un espesor más elevado.
- Deposición de una delgada película de diversa naturaleza sobre el vidrio plano.
- Relleno de la cámara de los dobles vidrios (con materiales aislantes, vacío, gases inertes bajos emisivos...

Para el estudio de aquellas tecnologías capaces de mejorar el ahorro energético de los ambientes, estudiaremos primero las fachadas de doble piel, pasando a continuación al estudio de los vidrios, distinguiendo dentro de ellos en estáticos y dinámicos.

#### **2.4.1. FACHADAS DE DOBLE PIEL**

Dentro de las fachadas acristaladas se va imponiendo cada vez más el uso de lo que se ha dado en llamar fachadas de doble piel, en las que existe una primera superficie de cristal (que forma la verdadera fachada exterior) separada de una segunda superficie de cristal (que constituye el límite del espacio habitable de la edificación), permitiéndose, con más o menos restricciones, el movimiento del aire en la cámara que definen ambas superficies.

A priori, podíamos decir que una fachada de doble piel es una solución constructiva que mejora la eficiencia energética de la envolvente, pudiendo incorporar diferentes tipos de vidrios tanto estáticos como dinámicos.

Es interesante en este punto citar la investigación realizada por la doctoranda en el marco del proyecto de Investigación INVISIO (Industrialización de Viviendas Sostenibles), Subproyecto 9, de Diseño y Experimentación de Soluciones Técnicas Innovadoras durante el curso académico 2007/2008, Línea: Optimización de sistemas de doble piel y ventana inteligente y Sublínea: sp9.4.1.- Optimización de dobles pieles inteligentes.

Este subproyecto pretendía diseñar nuevas soluciones técnicas y constructivas innovadoras que se puedan aplicar en sistemas modulares de construcción industrializadas que maximicen la calidad y la eficiencia de un tipo de vivienda que progresivamente está alcanzando un alto desarrollo, como es la vivienda prefabricada. Este subproyecto, liderado en su totalidad por el grupo TISE (Técnicas Innovadoras y Sostenibles en la Edificación) y perteneciente al Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la UPM, del cual llegué a formar parte activa de él hasta el año 2008, liderando en aquella época como investigadora principal, una de las líneas de investigación, que me permitió elaborar el documento adjunto en Anexo 5 que a continuación se comenta.

Por considerarse un sistema constructivo capaz de reducir activamente las cargas energéticas y su alta relación con la eficiencia energética con los vidrios especiales, se expone a continuación un resumen de las distintas investigaciones llevadas a cabo y desarrolladas en el seno de dicho grupo de investigación.

Por no ser objeto principal de nuestra investigación, se expone a partir del documento adjunto, y publicado en el trabajo de investigación presentado para el Diploma de Estudios Avanzados en Julio de 2008 en el Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la UPM, los beneficios que desde el punto de vista energético tiene la fachada de doble piel, según las conclusiones del citado estudio. Una optimización de la fachada de doble piel, sería la incorporación de vidrios dinámicos a ella, y por tanto capaz de reducir las cargas energéticas en el interior de la vivienda.

Por otro lado, el concepto de funcionamiento de una doble piel de aire, es similar al de un vidrio con cámara de agua en circulación. Se trata de la circulación de un gas o un fluido (aire o agua en este caso), que tras su precalentamiento o preenfriamiento es capaz de calentar o enfriar la vivienda, bien por introducción de ese aire o por transmisión de calor en caso del vidrio con agua. Por otro lado, el aprovechamiento de ese calor, es fundamental en ambos casos. Debido a su similitud y relación, se considera esencial su estudio.

#### Resumen comentado a partir del documento adjunto en Anexo 5.

El objetivo principal de dicha línea de investigación era el generar conocimiento para posibilitar el empleo de grandes cerramientos de vidrio, de modo que se minimice el impacto negativo sobre el comportamiento energético del edificio, mediante el estudio de la doble piel de vidrio, el estudio de la cámara de aire y el análisis del problema termo-fluido-dinámico (circulación de aire) con el fin de obtener un ahorro energético en la climatización de la vivienda utilizando el aire bien precalentado, bien natural, en el interior de la vivienda, tal y como se expone en el documento adjunto.

El documento se divide en tres fases más conclusiones y futuro plan de trabajo, que por el momento obviaremos. La fase I, expone un completo estado del arte y de la técnica, y la fase II se realiza una descripción del comportamiento teórico de la fachada de doble incorporada al prototipo de la casa Solar presentada al concurso Solar Decathlon 2007, tal y como se ha expuesto en el punto 2.3.1. Por último, una fase III, describe las variables que afectan al comportamiento de una doble piel (espesor de la cámara de aire y rejillas de aire).

Se trata sobre todo de un análisis teórico, a la falta de datos de monitorización, previstos en un futuro en el plan de trabajo, que no se llegó a realizar durante mi permanencia en el grupo, pero que dan una visión bastante detallada de las ventajas y desventajas de una doble piel de vidrio.

El estudio concluye, a través de un estudio realizado a partir de IEE BESTFACADE INFORMATION TOOL del proyecto Bestfacade<sup>15</sup>, en los ahorros de calefacción y aire acondicionado, al comparar una fachada de doble piel ventilada natural y mecánicamente.<sup>16</sup>

A la hora de realizar las conclusiones, analizaremos los resultados desde dos puntos de vista, el teórico y el experimental.

### **Teórico.**

Este punto analiza toda la documentación teórica encontrada tras revisar materias tanto nacionales como internacionales. De aquí se saca en conclusión, que desde los primeros objetivos de la doble piel que pretendía minimizar los efectos nocivos del calentamiento de una fachada de vidrio, que había sido elegida por razones estéticas, actualmente, se busca el control del aire en la cámara intermedia. Aún no se ha llegado al control de los flujos del aire en una fachada de doble piel, pero sus antecedentes ya nos demuestran la reducción de las cargas energéticas en el interior de los edificios.

Una optimización de la doble piel, podría ser la incorporación de vidrios dinámicos, pues reduciría el uso de protecciones solares, así como aún más las cargas energéticas de calefacción y aire acondicionado.

La domótica jugaría un papel fundamental en estos estudios.

### **Experimental.**

Tras los resultados obtenidos, tanto del estudio teórico de la doble piel incorporada en el prototipo SD7, como del estudio de las distintas configuraciones de fachada realizadas con el programa Besfacade, podemos concluir diciendo que se trata de un sistema constructivo que si se le incorporan algunos de los vidrios dinámicos que vamos a exponer en el punto 2.3 de este trabajo de investigación, podrían reducir de un gran modo las cargas de aire acondicionado y calefacción, superior a un 40 %, tal y como se había calculado para una fachada de doble piel con vidrio sencillo. De este modo podría eliminarse algunos de los inconvenientes de las dobles pieles, como son los efectos de deslumbramiento y eliminación de protecciones solares.

Añadiendo una tercera cámara, podrían incorporarse a su estudio los vidrios con circulación de agua, aunque si comparamos ambos sistemas, tal y como indica T.T. Chow (2009) la capacidad de extracción de calor de los vidrios con agua circulante es mucho mejor que la doble piel de aire.

---

<sup>15</sup> Best façade project. <http://www.Bestfacade.com>. Ver estudio en Anexo 5. Tipología de fachadas. Estudio con Bestfacade.

<sup>16</sup> Ver conclusiones del estudio en el punto 4 del Anexo 4: Informe Diseño y experimentación de soluciones técnicas innovadoras. (pg. del informe 22, 23).

### 2.4.2. VIDRIOS ESTÁTICOS

Es un aspecto fundamental de esta tesis diferenciar entre vidrios estáticos, es decir, aquellos que no cambian sus propiedades a través del tiempo, y dinámicos, como aquellos que son capaces de modificarlas, ya sea en función de las condiciones climáticas exteriores o por el propio usuario.

Dentro de los vidrios estáticos, la industria de la construcción cuenta con una serie de productos acristalados que mejoran las prestaciones energéticas del vidrio sencillo en las direcciones en las que se aprecian sus debilidades, a saber, pérdidas térmicas o bajo aislamiento con tiempo frío y ganancias térmicas por soleamiento con tiempo cálido. Para la mejora de sus prestaciones con respecto al aislamiento térmico encontramos:

#### 2.4.2.1. VIDRIO SENCILLO O DOBLE CON CÁMARA DE AIRE. PARÁMETROS ÓPTICOS Y TÉRMICOS DEL VIDRIO PLANO.

No podemos adentrarnos en el estudio de los materiales innovadores, ya sean estáticos o dinámicos, sin un estudio de las propiedades ópticas y térmicas de un vidrio plano sencillo, pues las características y el comportamiento energético del resto de los materiales a describir a lo largo de este capítulo, dependerán de éstos.

Por lo tanto, un punto importante antes de comenzar es establecer las propiedades térmicas y ópticas de un vidrio plano sencillo, para un mejor entendimiento de los materiales innovadores.

Entender el comportamiento de un vidrio con respecto a la longitud de onda de la radiación solar es básico para poder profundizar en sus características posteriores. Recordamos primeramente en la siguiente tabla la subdivisión espectral de la radiación solar, explicada en el punto anterior.

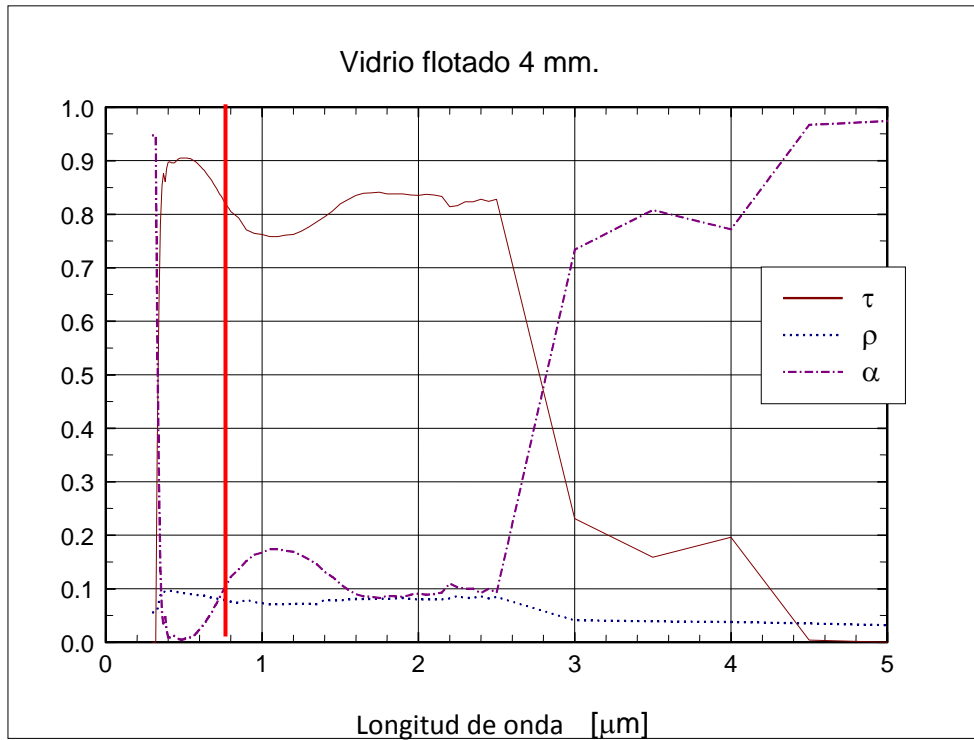
Tabla 2-VI. Subdivisión espectral de la radiación solar.

<b>Espectro</b>	<b><math>\lambda</math> (nm)</b>	<b>% Energía</b>
Ultravioleta	150-380	2.3
Visible	380-780	54
Infrarrojo cercano ( $I_c$ )	780-2500	42.4
Infrarrojo lejano ( $I_l$ )	2500-1 mm	1.3

Una de las características más interesantes del vidrio es que bajo una longitud de onda de 2500 nm ( $I_c$ ) presenta una buena transmitancia, consintiendo por lo tanto a la radiación transmitirse enteramente hacia el interior del ambiente. El comportamiento cambia para longitudes de onda mayores, siendo absorbido, y haciendo calentar el interior del recinto (efecto invernadero). Se observa una



transmitancia máxima de la radiación infrarroja (a partir de la línea roja dibujada) en la gráfica 4 adjunta.



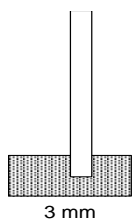
Gráfica 2-3. Propiedades ópticas espectrales de un vidrio claro de 4 mm. Fuente: Tesis Michele Zinzi.

A continuación se muestran algunas de las propiedades físicas del vidrio, siendo interesante notar como el valor de conductividad es indicativo de un material no particularmente aislante, y como el elevado valor de emisividad indica una elevada propensión a los cambios térmicos a nivel de radiación.

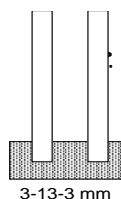
De la tabla 2-VII se deduce como un vidrio doble con cámara de aire puede reducir el valor U.

Tabla 2-VII. Tabla de Características de diversas composiciones de vidrio. Fuente: realización propia.

Ventana	$\tau_e$	$\rho_e$	$\alpha_e$	$\tau_v$	$\tau_{IR}$	g	$U_c$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[W/m <sup>2</sup> °C]



0.837	0.075	0.088	0.898	0.000	0.86	6.306
-------	-------	-------	-------	-------	------	-------



0.737      0.128      0.135      0.810      0.000      0.76      2.790

#### 2.4.2.2. VIDRIOS DE CONTROL SOLAR.

Han sido la primera mejora respecto a los tradicionales vidrios claros con el objetivo de reducir la carga térmica y el exceso de iluminación debido a la radiación solar entrante, bien con la utilización de vidrios coloreados en su masa en la que parte de la radiación incidente era absorbida por el material y parcialmente devuelta al exterior, o bien mediante depósitos químicos superficiales en el que la radiación es reflejada directamente al exterior (vidrios reflectantes).

Estos vidrios presentan como ventajas una reducción del factor solar  $g$ , cualidades estéticas debidas a los efectos cromáticos, y permiten la visión del espacio exterior durante el día desde el interior, pero no viceversa.

Como inconvenientes a numerar: no se mejora el factor  $U$  sino sólo el factor solar; en la mayoría de los casos no hay un comportamiento selectivo, teniendo una elevada transmisión en el espectro visible y una elevada reflexión en sector del infrarrojo, implicando una escasa luminosidad de los ambientes; la reducción del factor solar no es un dato siempre positivo durante el transcurso del año, sobretodo en épocas invernales; por último pueden producir reflexiones hacia el interior pudiendo provocar deslumbramientos.

#### 2.4.2.3. VIDRIO DOBLE CON GAPA METÁLICA DE BAJA EMISIVIDAD.

Como se ha visto anteriormente el vidrio es prácticamente opaco a la radiación infrarroja de onda cercana, creyendo por tanto que el vidrio normal actúa como una "trampa" de la radiación del infrarrojo lejano. Es verdad que el vidrio pierde su transparencia a las longitudes de onda más largas que las contenidas en el espectro visible, pero en este caso la opacidad al infrarrojo significa que se comporta como un cuerpo negro.

De hecho todos los materiales (excepto los metales y recubrimientos de baja emisividad, se pueden considerar como cuerpos negros, absorbiendo intensamente el infrarrojo lejano, sin importar su color. Por lo tanto el vidrio actúa como una esponja para la radiación en presencia del infrarrojo lejano vuelto a radiar, calentando con facilidad el vidrio y transmitiendo por conducción esa energía a través de él. Esto contradice el mito comúnmente admitido de que refleja el infrarrojo lejano hacia el interior.<sup>17</sup>

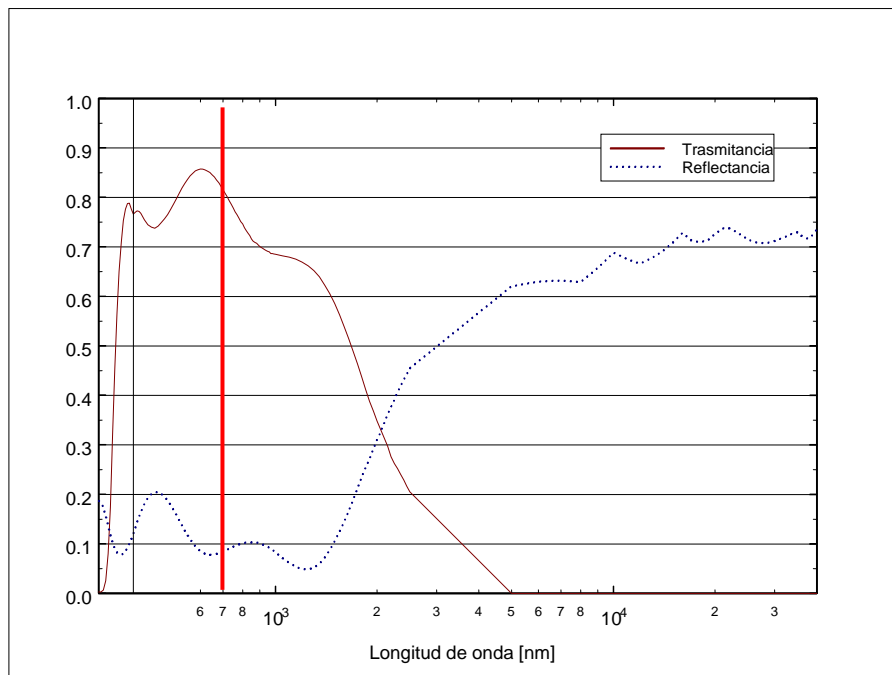
<sup>17</sup>(Amstock, 1999). Pg. 374.

Una capa de baja emisividad y de alta transmisión solar, es la primera "trampa" verdadera para la radiación, comportándose como se creía en un primer momento el vidrio común. La alta reflectividad de una capa baja emisiva al infrarrojo de onda larga, hace rebotar la radiación que se origina en el interior del recinto, de regreso hacia éste. Puesto que sale menos radiación, la radiación neta se eleva, incluso después de tener en cuenta una transmisión solar reducida del vidrio con recubrimiento.

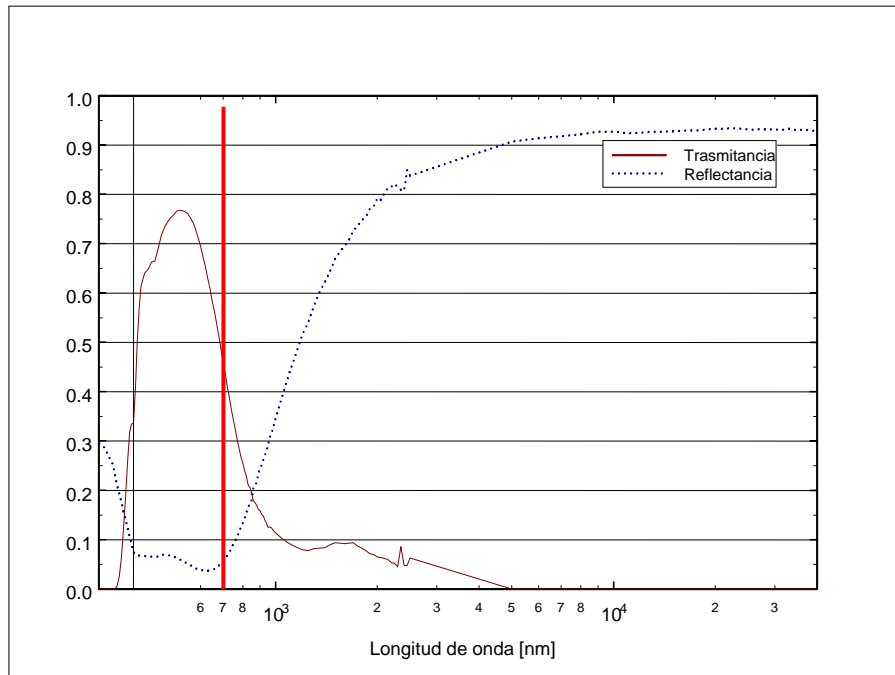
La baja emisividad en presencia de baja transmisión significa reflexión elevada. También significa que cualquier energía mantenida en el recubrimiento tiene un momento difícil para salir como radiación: la energía no se puede emitir desde la superficie, de aquí la razón para el nombre del producto: capa bajo emisiva.

Por lo tanto, el recubrimiento de baja emisividad funciona como una trampa para la radiación al reflejar la radiación térmica, al mismo tiempo que permanece transparente para la luz diurna, y en algunos casos para la radiación solar entrante. Si se compara con las características espectrales del vidrio sencillo, la transmitancia se reduce, notablemente, y la reflectancia es hasta un 75% mayor en el infrarrojo lejano.<sup>18</sup>

El posicionamiento de la película permite al vidrio doble funcionar bien como captación solar o como filtro solar. Si se coloca la película sobre la cara 2 (cara interna del vidrio externo), se reduce el factor U y el factor solar, ya que la radiación es absorbida en la proximidad de la superficie externa. Si se coloca la película sobre la cara 3 (cara externa del vidrio interno), la radiación que atraviesa el vidrio externo golpea el vidrio interno que, por la presencia del externo, no podrá devolverla al interno, haciendo funcionar la ventana como captación solar. (Ver gráficas 2-4 y 2-5).



<sup>18</sup> Ibid.



Gráfica 2-4 y Gráfica 2-5. Características espectrales de un vidrio bajo emisivo como captación solar cara 3 (izquierda) y como filtro solar, cara 2 (derecha). Fuente: Tesis Michele Zinzi.

Una mezcla de ambos tipos definidos anteriormente son los llamados vidrios mixtos. En ellos las capas metálicas pueden realizar las dos funciones citadas anteriormente simultáneamente, un aumento del aislamiento y una disminución del factor solar.

Aún en estado de prototipo se conocen vidrios estáticos especiales de altas prestaciones que podrían mejorar el comportamiento energético de los vidrios actuales. Únicamente los nominaremos a continuación, puesto que son objeto de estudio del doctorando Luis Alonso Pastor, en el actual desarrollo del trabajo tutelado y de la posterior tesis doctoral, bajo la tutela del profesor Benito Lauret.

#### 2.4.2.4. VIDRIOS CON AEROGEL

El aerogel es un material constituido por partículas de sílice y entre un 90 - 99.8% aproximadamente de aire. Se caracteriza por una estructura porosa abierta transparente y de baja densidad, que le confiere óptimas prestaciones tanto ópticas como energéticas.

El aerogel monolítico es extraordinariamente caro, es quebradizo y su transparencia no es perfecta. El aerogel en gránulos, llamado nanogel, convierte al acristalamiento en translúcido, perdiendo la transparencia y las vistas.

Por tanto, estos vidrios aportan altos valores de aislamiento a cambio de sacrificar las vistas.

#### **2.4.2.5. VIDRIOS AL VACÍO**

El principio fundamental del vidrio al vacío es eliminar cualquier gas en la cámara y así mejorar su aislamiento térmico al prescindir de la conductividad y de la convección del gas presente en la cámara.

Las ventajas principales son: la independencia de las propiedades aislantes del vidrio con respecto al espesor de la cámara; el aspecto de la ventana, casi idéntico a aquel de un doble vidrio tradicional; y el uso de estos vidrios con bajos emisivos, para reducir la transmisión.

Su principal inconveniente es que la diferencia de presiones entre el exterior (aproximadamente 1 atmósfera) y el interior genera unas tensiones sobre ambas caras del doble vidrio, comprimiéndolas hacia el interior, con el riesgo de que lleguen a tocarse en su parte central. Para eliminar este riesgo se introducen pequeños elementos de separación entre los dos paneles, para impedir su contacto. Estos separadores (*pillars*) tienen un pequeño impacto en la transparencia (son visibles) y en el aislamiento térmico conseguido (son puntos de pequeño puente térmico). Igualmente el sellado perimetral se convierte en un pequeño puente térmico.

Las propiedades ópticas y el factor solar de los vidrios al vacío dependen de los vidrios que lo constituyen, generalmente vidrios planos flotados, con eventuales recubrimientos bajos emisivos. El factor U dependerá de las dimensiones y el número de separadores utilizados y de su material.

#### **2.4.2.6. MATERIALES SEMI-TRANSPARENTES AISLANTES**

Estos materiales se caracterizan por usar estructuras geométricas para limitar las dispersiones térmicas por convección e irradiación. Actualmente están en fase de desarrollo, algunos prototipos con policarbonato, y ahora incluso en vidrio, como cerramientos divisorios capaces de bloquear los movimientos convectivos del aire y modificar el paso de la radiación.

#### **2.4.2.7. DISPOSITIVOS DE REDIRECCIONAMIENTO DE LUZ NATURAL**

Pertenecen a esta categoría aquellos materiales capaces de redireccionar la radiación incidente, o aquellos que presentan valores de transmitancia sensibles a determinados ángulos de incidencia, para bloquear o desviar la luz natural. Un tipo de componentes de este tipo es aquel constituido por un doble vidrio con lamas o trillaje (prismáticas o planas) internas, fijas o móviles, que en función de la posición del sol varían la transmitancia luminosa del elemento. Lo último de este tipo de materiales con redireccionamiento de la luz, son las películas holográficas. El efecto de redireccionamiento de la radiación incidente, en este caso, se obtiene mediante la difracción de una estructura prismática invisible obtenida mediante una impresión holográfica.

### 2.4.3. VIDRIOS CROMOGÉNICOS. ESTADO DE LA TÉCNICA.

En este capítulo se van a estudiar los distintos vidrios dinámicos, llamados también en la literatura anglo-americana "smart glazings", dentro de los cuales distinguiremos por un lado los vidrios cromogénicos y por otro, los vidrios con fluido circulante en su cámara, encontrándose ambas tecnologías tanto en proceso de investigación como en de comercialización, éste aun muy lentamente. En este primer punto nos centraremos en los vidrios cromogénicos.

La posible aportación de los vidrios capaces de cambiar su color frente a diversas condiciones está en que al cambiar la cantidad de radiación que entra en un espacio, permitiría reducir parcial o totalmente los elementos de oscurecimiento. Su reacción, espontánea o provocada frente a condiciones externas cambiantes podría ser beneficiosa para el comportamiento energético del edificio.

Una pregunta fácil de hacerse sería el porqué se llaman vidrios inteligentes. Se llaman vidrios cromogénicos a aquellos vidrios que son capaces de cambiar su color-opacidad bien en función de las condiciones externas a la que es expuesto o bien aplicándole un pequeño potencial eléctrico. Pues bien, hablamos de vidrios inteligentes, si forma parte de un sistema ya inteligente, es decir, un edificio domotizado, que sepa actuar o reaccionar según las condiciones expuestas previamente y activar el mecanismo en cuestión. Entonces, como tal parte, podemos hablar de un vidrio inteligente.

La ventaja de uso de estos vidrios es que pueden ser utilizados tanto en climas cálidos como fríos, tanto en periodos invernales como veraniegos.

- En periodo invernal o climas fríos: el vidrio puede permanecer claro, para permitir el máximo de entrada de radiación solar, reduciendo el gasto de calefacción y consumo energético al poder eliminar el uso de persianas o protecciones solares.
- En periodos cálidos o periodos veraniegos: la radiación puede ser absorbida o reflejada por el cambio de color o de transparencia de la ventana, haciendo disminuir la temperatura interior del ambiente, con el consiguiente ahorro energético en aire acondicionado.

En ambos casos reduce en gran parte el deslumbramiento provocado por la entrada de una excesiva iluminación.

Estos vidrios, según Platzer (2004)<sup>19</sup> pueden clasificarse en dos tipos, que a continuación describiremos y estudiaremos por separado:

- ✓ Vidrios pasivos
  - Fotocrómicos
  - Termocrómicos
- ✓ Vidrios activos
  - Electrocrómicos

---

<sup>19</sup> (Platzer, 2003)

- Gasocrómicos
- Vidrios de cristal líquido disperso
- Vidrio de partículas en suspensión

#### **2.4.3.1. VIDRIOS CROMOGÉNICOS. VIDRIOS DINÁMICOS PASIVOS**

Un vidrio pasivo, es aquel que es capaz de cambiar su color o transparencia a partir de las condiciones externas climáticas al cual es expuesto el edificio. Se definen y se exponen a continuación las características principales de cada uno de ellos.

##### **A. FOTOCRÓMICOS**

Los vidrios fotocromáticos, aún en proceso de investigación, se basan en uno de los fenómenos de los cambios de estado más antiguo y es datado ya desde 1960.

Este material cambia su transparencia en respuesta a la intensidad lumínica, oscureciendo en función de la radiación, usualmente la ultravioleta, entre unas longitudes de onda que va desde la 300 a los 400 nm, y volviendo a sus propiedades originales en la oscuridad. Básicamente el fenómeno es el cambio reversible de una reacción química entre dos estados de energía con espectros de absorción distintos. Este cambio de estado es inducido generalmente por radiación electromagnética (usualmente la UV).

Los cristales fotocromáticos, han sido ya usados y probados, y son altamente conocidos en las lentes de las gafas de sol, cambiando desde el claro en interiores a oscuro en ambientes exteriores. La radiación ultravioleta debilita los cristales de plata, formando piezas metálicas de plata, la cual absorbe la luz, y reduce la transmitancia visible.

Estos cristales, pueden ser útiles en conjunción con la luz solar, permitiendo la transmisión suficiente de luz, según las necesidades requeridas, recortando los excesos de luz que crea luminosidad excesiva y sobrecargas del sistema de refrigeración.

Aunque pequeñas unidades han sido producidas en volúmenes reducidos a nivel de consumidor privado, aún no está disponible en el mercado, debido a su elevado coste, ya que este procedimiento no puede ser usado sobre el vidrio flotado común, haciendo prohibitivamente costoso su utilización en la arquitectura<sup>20</sup>.

El Lab's Environmental Energy Technology Division de Berkeley (California), está estudiando y desarrollando un nuevo electrodo para estos vidrios que consiste en una película transparente de hidróxido de Níquel [Ni(OH)<sub>2</sub>] y dióxido de Titanio [TiO<sub>2</sub>], para impedir la formación de gas oxígeno en la cámara. Cuando es expuesto a la luz ultravioleta, el electrodo transparente, se oscurece en una transición que va desde el gris al negro. Cuando la luz incide en la capa conformada por el Titanio-Níquel, se produce una huída de electrodos del Ni(OH)<sub>2</sub> al TiO<sub>2</sub>, provocando una oxidación del Níquel a Ni<sub>3</sub> y a Ni<sub>4</sub>. Cuando la luz es bloqueada, la reacción se hace

---

<sup>20</sup> (M. Zinzi, 1999)

reversible. Según Cronin (1999)<sup>21</sup> la coloración total de los prototipos ensayados hasta el momento, requiere al menos 10 minutos, aunque aún se deben resolver algunos problemas, debido a que ahora mismo el material se oscurece principalmente en respuesta a la luz ultravioleta, y es necesario modificar la película de Níquel-Titanio, para que responda eficientemente al espectro solar, así como también se debe seguir desarrollando dicha capa, para que sean lo más transparentes y uniformes posibles.

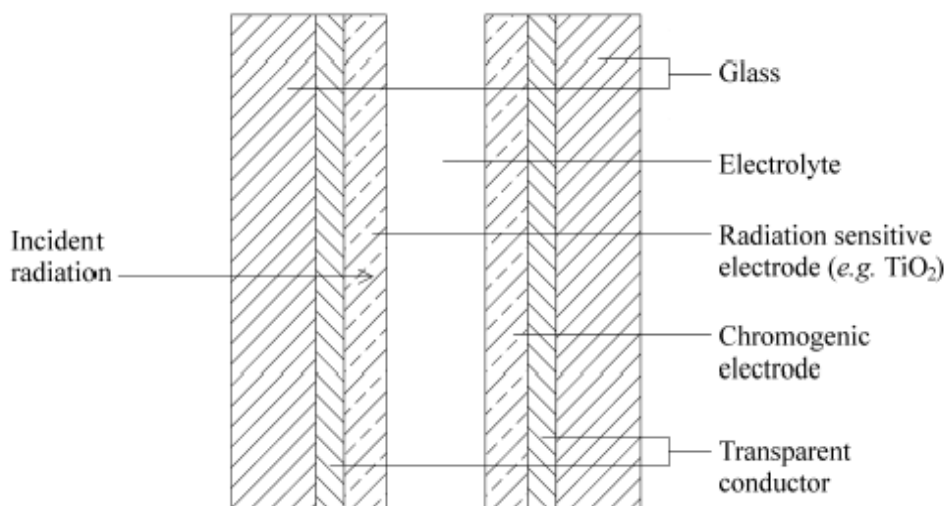
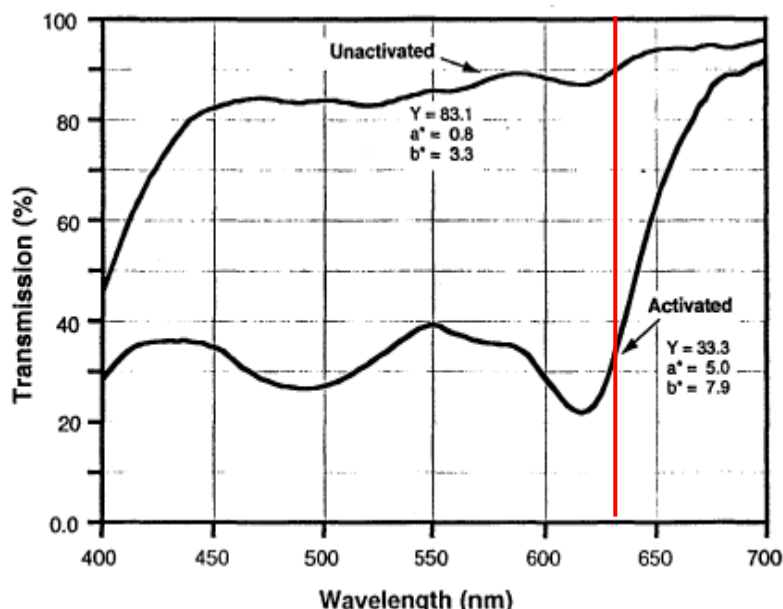


Fig. 2-32. Imagen de un vidrio fotocromático. Fuente: Cronin, J.P "Electrochromic glazing"

Su rango de transmitancia visible varía entre un 83% (no activado o transparente)-33% con un color azul (activado). Sus propiedades en función de la transmisión de onda, se muestran en la siguiente gráfica.



Gráfica 2-6. Espectro de transmisión de un vidrio Fotocromático. Fuente: Lampert (1995)<sup>22</sup>

<sup>21</sup> (Cronin, Gudgel, & Kennedy, 1999)

<sup>22</sup> (Larnpert, June 1995)



Observamos, como el nivel de transmitancia visible aumenta a casi un 90% a partir de los 600nm, cuando ya casi nos acercamos a los infrarrojos (línea roja), por lo que se observa que el vidrio fotocromático no disminuye la radiación infrarroja, causante, como se ha visto del efecto invernadero.

#### Ventajas

- Reaccionan a la variación de la intensidad de la luz natural
- React to variation (intensity) in light (only source of control)
- La luz del sol al incidir sobre el vidrio, lo activa oscureciéndolo.
- Reduce la sensación de deslumbramiento.

#### Desventajas

- Solo reaccionan a la luz solar.
- No tienen un control eficiente sobre el calor solar.
- No pueden ser controlados manual o eléctricamente por el usuario.
- Debido a que el sol en invierno está más bajo, y la entrada de radiación es más directa, podría producir un tintado mayor en el vidrio, y por tanto incrementar las necesidades de iluminación eléctrica. En verano, debido a que el sol está más alto y la radiación menos directa que invierno, el vidrio no se llegaría a colorear todo lo deseado y no bloquearía lo suficiente la entrada de radiación.
- Hasta el momento solo pueden ser producidos a pequeña escala (por ejemplo gafas de sol).

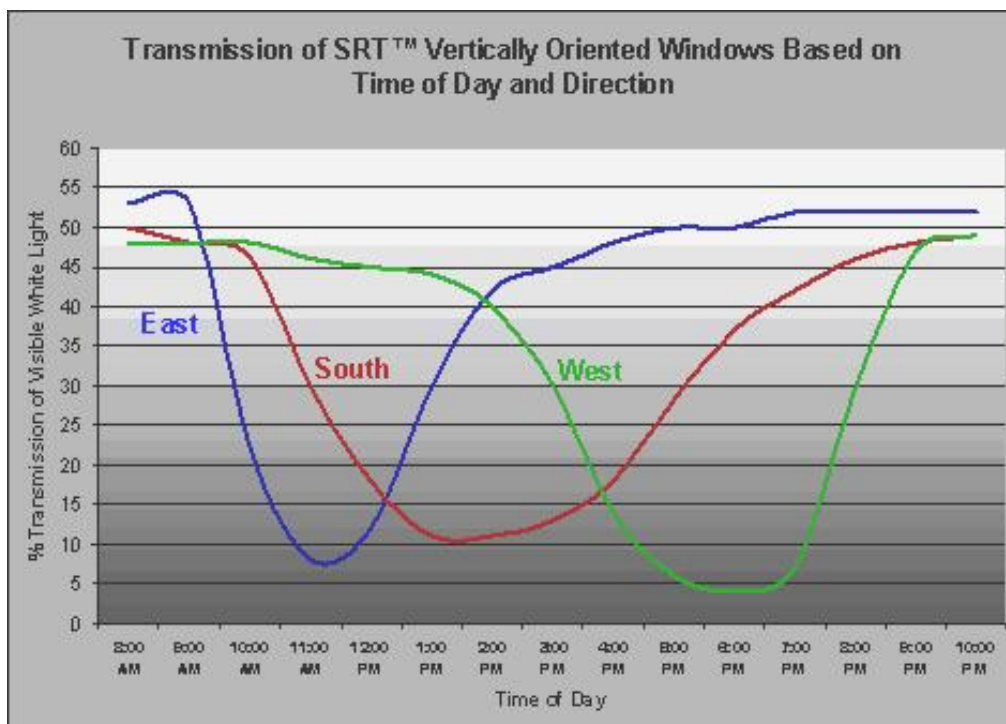
### **B. TERMOCRÓMICOS**

Un vidrio termocrómico, cambia su transparencia en respuesta a la temperatura, inducida por una reacción química. Los materiales termocrómicos se conocen desde 1870 aproximadamente, y al igual que el fotocromismo, es uno de los procesos cromogénicos más antiguos que se conocen.

Los materiales actualmente bajo desarrollo para ventanas, son geles entre vidrio y plástico (hidrogeles de polímero), que varían desde un estado claro, cuando baja la temperatura, cambian a un color difuso y blanco, que refleja la luz, cuando sube la temperatura. En su estado activado, la visión a través de él, es nula. Algunos vidrios podrían en efecto, eliminar totalmente la transmisión de luz solar, cuando las cargas de aire acondicionado resulten demasiado altas.

El vidrio al absorber la radiación, a causa del laminado, la convierte en calor. Más caliente se pone el vidrio, más oscuro se volvería, y viceversa. Debido a que el laminado solo absorbe radiación solar y la radiación varía en función de la posición del sol, la lámina termocrómica absorbe más radiación a ángulos altos. La siguiente curva, responde al funcionamiento del vidrio en función del sol en distintas

orientaciones, Este, Sur y Oeste de una ventana vertical. Como se puede observar la transmisión de luz varía en función del sol.



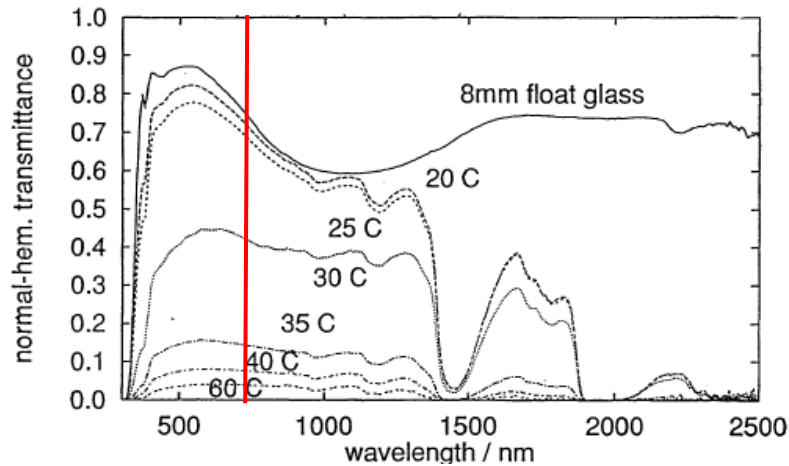
Gráfica 2-7. Transmisión visible del vidrio termocrómico a distintas orientaciones durante medio día. Fuente: Pleotint. Cedido por Fred Millet.

La temperatura del vidrio, la cual va en función del ambiente exterior e interior, regularía la cantidad de radiación solar que incide.

Los termocrómicos, están pensados esencialmente para lucernarios, porque en su estado opaco no interfiere en la visual, tanto como en una ventana normal. Algunas unidades vienen con una temperatura de encendido preseleccionada, la cual tendría que ser escogida rigurosamente en función de las necesidades.

Se han realizado y ensayado prototipos de vidrios, pero no están comercialmente disponibles por el momento. Los actuales problemas con los geles son la inestabilidad ante la radiación ultravioleta, el ciclo de vida y la no homogeneidad durante el encendido.

La siguiente gráfica nos muestra las características ópticas de una ventana termocrómica con hidrogel, consistente en 1mm de espesor de gel entre dos de vidrios flotados de 4mm cada uno.



Gráfica 2-8. Características ópticas de una ventana termocrómica. Fuente Lampert (1995)<sup>23</sup>

Observamos como el nivel de transmitancia visible disminuye más en función del aumento de la temperatura interior, permaneciendo (temperatura a 60°C) invariable a la longitud de onda. A 20°C, el nivel de transmitancia visible es de un 80%, reduciéndose a casi un 10% correspondiente a un aumento de la longitud de onda (1400nm): radiación infrarroja.

Para más información ver Anexo 6 donde se adjuntan la información recibida por la empresa Pleotint.

#### 2.4.3.2. VIDRIOS CROMOGÉNICOS. VIDRIOS DINÁMICOS ACTIVOS

Un vidrio activo, cambia su transparencia, por la aplicación de una pequeña corriente eléctrica, controlada por los propios ocupantes del edificio o por una instalación domótica.

##### A. VIDRIOS DE CRISTAL LÍQUIDO DISPERSO (LCD):

Podemos definir el cristal líquido como una fase del vidrio entre los estados de sólido y líquido, tal y como muestra el siguiente esquema:



Fig. 2-33. Esquema de diferenciación del cristal líquido. Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Cristal\\_l%C3%ADquido](http://es.wikipedia.org/wiki/Cristal_l%C3%ADquido)

<sup>23</sup> (Larnpert, June 1995)

Es una fase intermedia entre sólidos cristalinos y líquidos isotrópicos. Son fluidos ordenados con propiedades anisótropas. Una variedad del fenómeno físico los hace uno de los más interesantes objetivos de la ciencia moderna. Sus únicas propiedades debido a su óptica anisótropa y a su gran sensibilidad a los campos eléctricos externos, permite numerosas aplicaciones prácticas.

En las siguientes imágenes se observa la diferencia entre las fases de un no-cristal líquido, y las fases de un cristal líquido.



Fig. 2-34. Vidrio suspendido colocado por SGG-Privalite encendido y apagado. Sala de reuniones Lloyds TSB. Londres. Fuente: SGG Privalite.

El cristal líquido es un tipo especial de estado de agregación de la materia que tiene propiedades de la fase líquida y la sólida. Dependiendo del tipo de cristal líquido, es posible, por ejemplo, que las moléculas tengan libertad de movimiento en un plano, pero no entre planos, o que tengan libertad de rotación, pero no de traslación.

Algunas de estas moléculas presentan propiedades ópticas según su orientación permitiendo o impidiendo el paso de la luz o actuando sobre su polarización. Su aplicación más directa es para la fabricación de pantallas de cristal líquido.

El principio de funcionamiento esquematizado en la siguiente figura es una matriz polimérica dispersas en gotas de cristal líquido con un comportamiento anisótropo.

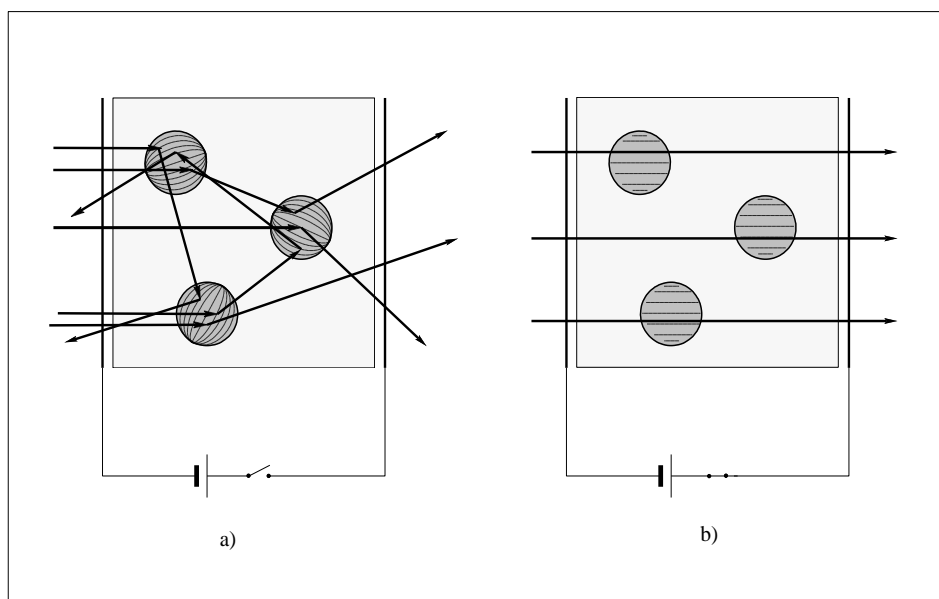


Fig. 2-35. Esquema de funcionamiento del cristal líquido. Fuente: Zinzi tesis (1989)

Una vez definido el cristal líquido, pasemos a describir una de sus aplicaciones que nos interesan en este campo, como son los vidrios de cristal líquido disperso (LCD).

Consiste en una fina película de cristal líquido que es colocado entre dos conductores eléctricos transparentes sobre delgadas películas de plástico y todo ello es laminado entre dos capas de vidrio. Cuando está apagado, el cristal líquido está desordenado y desalineado, reflejando la luz, y consiguiendo un estado translúcido.

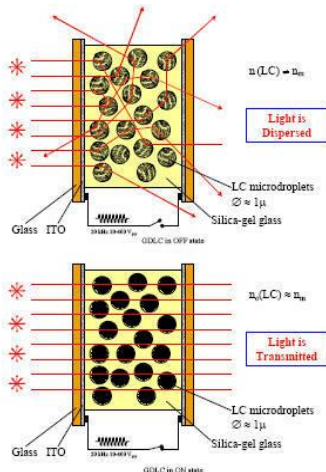


Fig. 2-36. Ilustración del funcionamiento de un GDLC, conmutando entre el estado opaco y transparente. La luz incidente es dispersada por las microgotas de GDLC (arriba), mientras que aplicando un campo eléctrico se consigue un material transparente. (Ilustración cedida por el CSIC)

Los LCD conmutan a simple vista, con la ventaja de que no se necesitan polarizadores<sup>24</sup>. Los tiempos de conmutación entre los estados OFF y ON son del orden de  $\approx 1$  ms, y se busca su reducción, ya que esto incrementaría sus posibilidades de aplicación. La posibilidad de incorporar color es viable y actualmente se está investigando en esta dirección.

Los vidrios de cristal líquido, tienen solamente dos estados, claro y difuso, y la potencia (0.5 W, operando entre 24 y 100V), debe ser continuamente aplicada al cristal, para mantener el estado de claro. El rango de transmitancia visible es aproximadamente del 50-80% según fabricante. Algunos productores ofrecen el vidrio en diversos colores e incluso curvados. Algunas aplicaciones realizadas ahora acerca de estos vidrios sobre los rayos ultravioleta, permiten su aplicación en exteriores, pero comúnmente es usado en interiores.

Cuando el vidrio es desconectado de su sistema especial de suministro de corriente, los cristales líquidos son objeto de difusión aleatoria y difunden luz en todas las direcciones.

Este principio permite que la pantalla ofrezca gran uniformidad de brillo.

<sup>24</sup> Un polarizador es un material con transmitancia selectiva a una determinada dirección de una onda electromagnética como la luz. Cuando un haz de luz atraviesa dicho material, la luz transmitida queda polarizada, disminuyendo su intensidad luminosa e incluso bloqueando su paso.

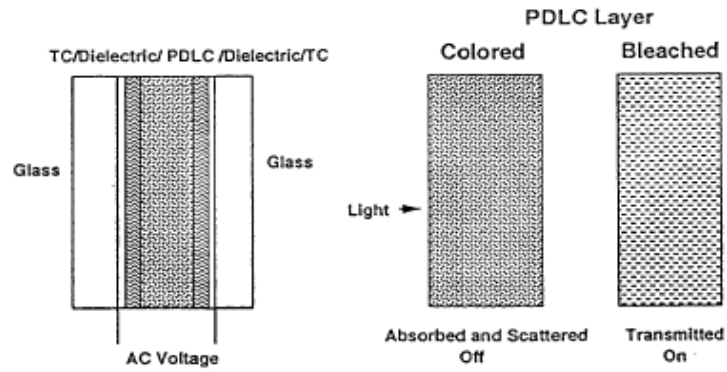
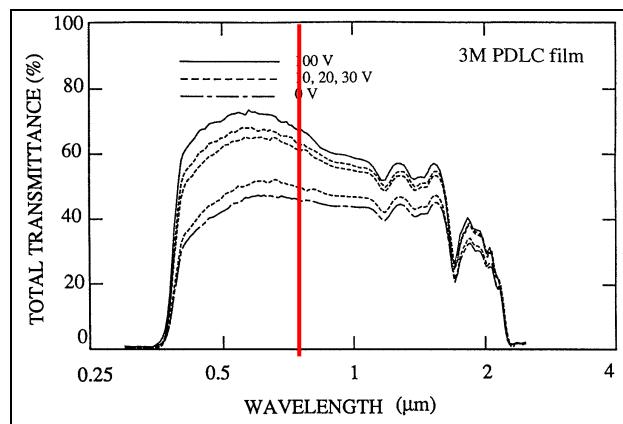


Fig. 2-37. Esquema de construcción de un vidrio de cristal líquido. (Los espesores no están a escala). Se muestra el estado apagado (translúcido) y encendido (transparente). Fuente: Lamper (1995)<sup>25</sup>



Gráfica 2-9. Características ópticas en función de la longitud de onda mostrando el estado apagado y encendido. Fuente: Lamper (1995)

Aunque estos materiales han alcanzado una maduración en el mercado bastante alta, no son muy interesantes bajo el punto de vista del ahorro energético, por diversas razones. En primer lugar en el estado transparente, deben estar continuamente alimentados con consumos energéticos (20 W/m<sup>2</sup>), además la diferencia de la transmitancia global entre el estado transparente y opaco (entre un 20 y un 30% respectivamente en el espectro visible y solar) con variaciones aún menores del parámetro de factor solar<sup>26</sup>. A diferencia de los electrocrómicos son capaces de difundir la luz con un elevado rango de modulación, encontrando aplicación como apantallamiento con fines divisorios de áreas por ejemplo en oficinas, limusinas...

Ventajas:

- Para paredes interiores.

<sup>25</sup> (Larnpert, June 1995)

<sup>26</sup> (Larnpert, June 1995)

Desventajas:

- Incluso en modo translúcido (apagado), hay una excesiva entrada de calor y luz solar.
- No ayuda a reducir las caras de aire acondicionado en verano.
- Requiere constante suministro eléctrico para mantenerlo activado (transparente).
- Debe usarse con vidrio de control solar o bajo emisivo, pues la capa de cristal líquido resulta altamente dañada por la radiación ultravioleta, por lo que no pueden usarse al exterior.

En España, se comercializa principalmente a través de Dream Glass S.L. junto con Vitro Cristalglass S.L. y Saint Gobain Glass, reduciéndose su investigación, según se ha comentado con estas empresas, al uso de estos vidrios en exteriores, tal y como ha demostrado la empresa DreamGlass, la aplicación del producto en exteriores, como en el edificio de C/Alcalá 135, en Madrid mediante su uso con vidrios de control solar, y en nuevas tecnologías capaz de obtener más transparencia y opacidad.

Se han encontrado artículos sobre cristal líquido, pero no se citan al dedicarse a sus características técnicas y a su fabricación y no a sus prestaciones energéticas, por lo que no resulta de interés para la tesis.



Fig. 2-38. Edificio en C/Alcalá 135. Fuente: Dream Glass S.L.

**B. GASOCRÓMICOS:**

En esencia, un vidrio gasocrómico, está compuesto de gas hidrógeno, solo o mezclado con otros gases inertes, que en cooperación con una capa electrocatalítica<sup>27</sup>, sirve como fuente de iones. Bajo la aplicación de un potencial

---

<sup>27</sup> Una capa electrocatalítica es una capa con un catalizador que participa en una reacción electroquímica. Los materiales catalizadores son capaces de modificar e incrementar la velocidad de las reacciones químicas. El electrocatalizador ayuda en la transferencia de

entre la capa electrocatalítica y el conductor transparente, los iones formados en el catalizador pueden ser transportados a través de un conductor de iones a la capa electrocrómica<sup>28</sup>, causando la coloración en su superficie. A la inversa, aplicando el potencial, y al exponerlo al oxígeno, se provoca una huída de los iones desde el electrodo electrocrómico volviendo a su estado transparente.<sup>29</sup>

Estos vidrios son parecidos a los electrocrómicos, y el color del vidrio es debido al hidrógeno introducido.

El componente activo de un vidrio Gasocrómico es una película de óxido de Tungsteno ( $WO_3$ ), más delgada de  $1\mu m$  de espesor, y laminada con un catalizador. Esta capa está localizada en la superficie interior del panel exterior de un triple vidrio, tal y como indica la siguiente figura. Cuando dicha película es expuesta a una baja concentración de hidrógeno, adquiere un color azulado, reduciendo la visibilidad y los valores de transmitancia visible. Variaciones en la concentración del hidrógeno, harían variar el color. Bajo la exposición a una pequeña concentración de oxígeno, vuelve a su estado original (transparente). La mezcla de gas es introducida en la cámara entre el panel exterior e intermedio de un triple vidrio. La segunda cavidad y el tercer vidrio, que suele llevar una capa bajo emisiva, asegura que el vidrio Gasocrómico obtenga unas propiedades térmicas adecuadas.

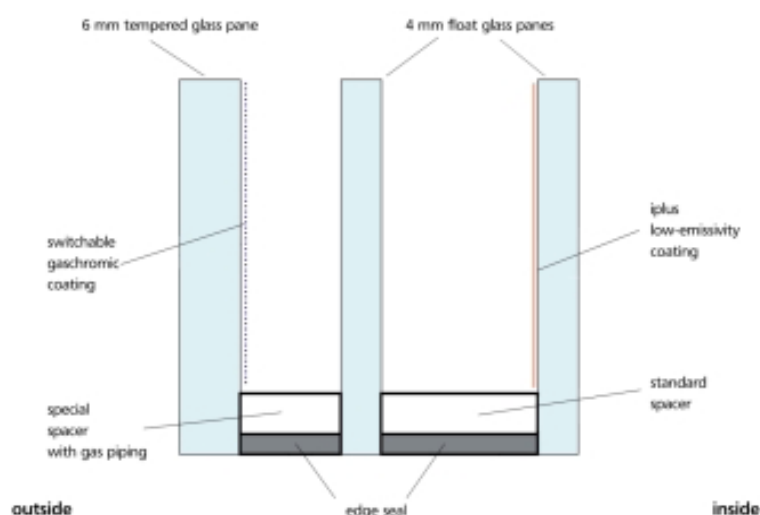


Fig. 2-39. Unidad triple de vidrio Gasocrómico. Fuente: Platze (2003)<sup>30</sup>

La transmitancia puede variar entre 0.10-0.59. Niveles de transmitancia menores a 0.01 para privacidad o control de la luminosidad, son posibles.

El gas requerido para el funcionamiento del sistema es producido en el interior de un circuito cerrado. El sistema está constituido de los siguientes elementos:

- Unidad de vidrio aislante o bajo emisivo incluyendo las conexiones para el suministro del gas.

---

electrones entre el electrodo y los reactivos, facilitando la transformación química establecida.

<sup>28</sup> Una capa electrocrómica es aquella que tiene la capacidad de cambiar de transparente a tinto mediante una reacción química provocada por el paso de corriente eléctrica.

<sup>29</sup> (Cronin et al., 1999)

<sup>30</sup> (Platzer, 2003a)



- Unidad de suministro del gas
- Tuberías de conexión.
- Unidad de control electrónico.

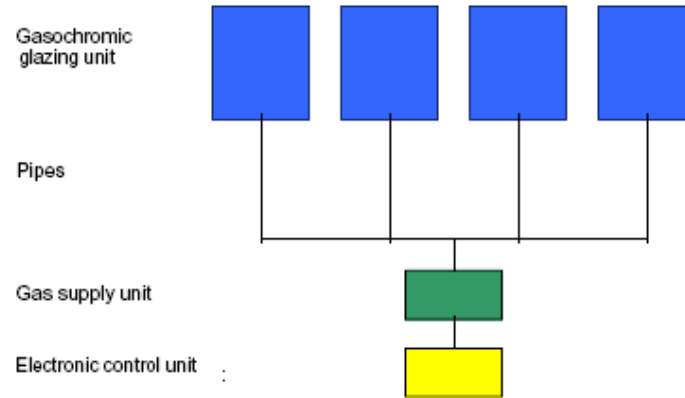


Fig. 2-40. Esquema de la estructura de un sistema de vidrio Gasocrómico. Fuente Platzer (2003)<sup>31</sup>

La unidad del suministro del gas consiste en un electrolito y una bomba, el cual es conectado a la ventana mediante un circuito cerrado. Idealmente, este suministro debería ser integrado a la fachada externa del edificio. Dicho suministro debería de ser capaz de proveer gas para el funcionamiento de 10m<sup>2</sup> de ventana. La rapidez de encendido varía entre 2 y 10 minutos.

La clave principal en los requerimientos de diseño de un vidrio gasocrómico en comparación con un vidrio convencional se basa en el hecho de que dicho vidrio está conectado a un completo sistema con cables eléctricos y tuberías. Para acomodar estos componentes el sistema de fachada debe proveer el suficiente espacio para que luego pueda ser conectado con cada ventana individualmente. El mejor método es acomodarlos en la cavidad formada fuera de la estructura usando tornillería más una cobertura embellecedora, tal y como indica la siguiente figura.

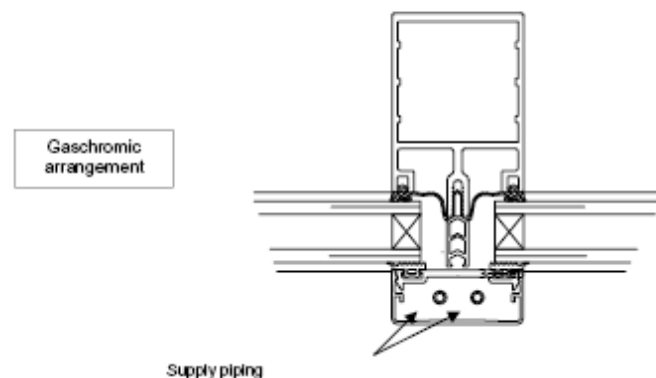


Fig. 2-41. Colocación de un vidrio Gasocrómico. Fuente: Platzer (2003)

<sup>31</sup> Ibid

El control de la unidad permitiría tanto manual como automáticamente. La integración a un sistema domótico previamente incorporado a la vivienda permitiría al vidrio encenderse o apagarse en función de las condiciones lumínicas, térmicas y de confort deseadas por el propio usuario.

Ventajas:

- Puede ser controlado por el propio usuario mediante una instalación domótica.
- Según estudios (Wittwer (2004))<sup>32</sup> es capaz de reducir las cargas térmicas de aire acondicionado y calefacción.

Desventajas

- Alta complicación tecnológica a la hora de instalar el vidrio.

**G. VIDRIO DE PÁRTICULAS EN SUSPENSIÓN (SPD):**

Este vidrio, controlado eléctricamente, utiliza una delgada capa de líquido, en el cual numerosas partículas microscópicas están suspendidas. En un estado apagado, las partículas están desordenadas y bloquea parcialmente la transmisión solar y la vista. Conductores eléctricos transparentes, permiten la aplicación de un campo eléctrico en la película de partículas dispersadas, alineándolas y aumentando así la transmitancia.<sup>33</sup>

Su transmitancia varía desde 0.22-0.05 a 0.57-0.12.

El tiempo de encendido es más limitado que el electrocrómico, y requiere unos 100 voltios, desde el estado de apagado (coloreado) al encendido (casi transparente), y puede ser modulado a cualquier estado intermedio. La potencia requerida es de 0.05W, tanto para encenderlo, como para mantenerlo en una constante transmisión si no está apagado adquiriendo un color azul cobalto.

En recientes investigaciones, se están planteando nuevos modelos, que requieren un voltaje menor a 35voltios, así como nuevas suspensiones que darían colores distintos (verde, rojo y violeta). Estos vidrios laminados, pueden ser fabricados ya hoy día en láminas de dimensiones de 1.2x2.4 m, tanto planos como curvos. La durabilidad y propiedades ópticos solares, no están verificadas actualmente.

Estos productos están entrando actualmente en el mercado, pero a un elevado coste.

---

<sup>32</sup> (Wittwer et al., 2004)

<sup>33</sup> (Cronin et al., 1999)

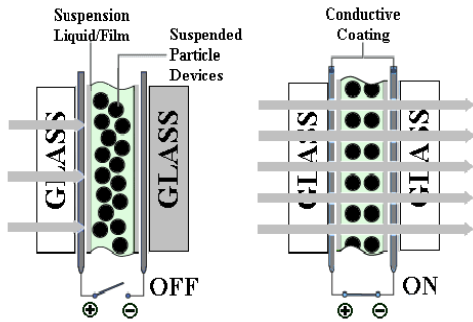
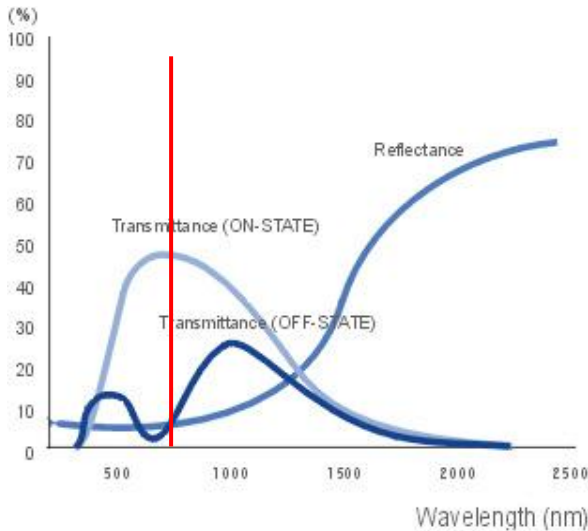


Fig. 2-42. Ilustración procedente del artículo: Mihai Oltean. "Switchable Glass: A possible medium for Evolvable Hardware"



Gráfica 2-10. Gráfico comparativo propiedades ópticas: Transmitancia (encendido y apagado) y reflectancia. Gráfico obtenido: LTI Glass

En la gráfica observamos como a medida que aumenta la reflectancia con la longitud de onda, la transmitancia, tanto en su estado encendido como apagado disminuye, siendo la transmitancia casi un 20% mayor en su estado encendido (transparente). Si observamos esto con la radiación infrarroja (a partir de 750 nm. Línea roja), se observa cómo es bastante transparente a esta longitud de onda, por lo que no sería recomendable en cuanto al control de un confort térmico.



Fig. 2-43. Transición del vidrio. Fuente: LTI Glass.

Ventajas:

- Fácil instalación
- Puede ser controlado por el propio usuario.

Desventajas:

- Requieren una constante aportación eléctrica para cambiar de estado.
- No aguantan la radiación ultravioleta<sup>34</sup>

**D. VIDRIOS ELECTROCRÓMICOS:**

Este epígrafe tiene una extensión algo mayor que los anteriores, debido a que el vidrio electrocrómico por presentar una especial relevancia con respecto a los otros vidrios cromogénicos citados anteriormente. En los anteriores se ha considerado incluir solamente la cita bibliográfica, sin embargo, debido a la mayor documentación e investigaciones encontradas sobre este tipo de vidrio se considera añadir que ha sido confeccionado a partir de Cronin (1999), documentos publicados por el LBNL, Ward (2006), Lampert (1995), Kraft (2006) y Roland Pitts (ver bibliografía), que una vez traducidos del inglés, han sido interpretados y reorganizados según el criterio de la autora de este trabajo.

Una capa electrocrómica (a partir de ahora se denominará EC) es un conjunto de capas "activables" de delgadas películas, que aplicados al cristal o al plástico, pueden cambiar su apariencia desde un claro (amarillo claro) a un azul oscuro (azul de Prusia), cuando se le aplica un pequeño voltaje, permitiendo siempre la visión a través de él.

*"Una capa electrocrómica es una capa nanométrica en multicapa, depositado sobre vidrio o plástico. El sistema consta de: conductores transparentes en el exterior del conjunto; capa electrocrómica activa y electrodo pasivo. El sistema funciona como una batería. Aplicándole un potencial bipolar a los conductores transparentes, lo cual causa una migración de iones litio a lo largo de la capa ionizada a través del electrodo pasivo hasta la capa electrocrómica"<sup>35</sup>*

Una acción electroquímica reversible causa la apariencia del vidrio tintado.

En la siguiente figura se observa la diferencia de transmisión-reflexión, de su estado claro al oscuro. En la imagen de la derecha (vidrio no activado), la transmisión es total (de un 85%). Sin embargo, en un vidrio coloreado, la transmitancia es menor (en función del rango aplicado), provocando el fenómeno de la reflexión.

---

<sup>34</sup> Según estudios realizados por Daniel Vazquez Moliní en la Escuela Universitaria de Óptica de la Universidad Complutense de Madrid. Los datos no están disponibles por el momento.

<sup>35</sup> (Cronin et al., 1999)

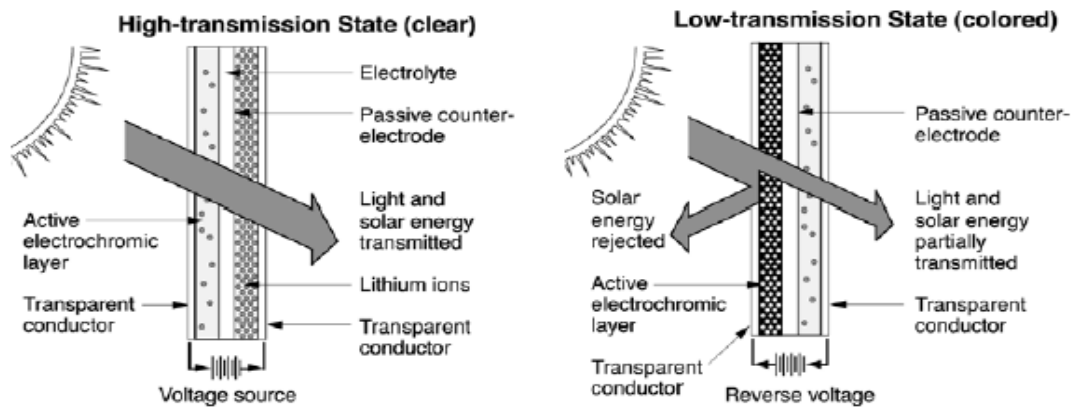


Fig. 2-44. Diagrama de un típico vidrio Electrocrómico. Fuente: LBNL

El material y la composición física del vidrio puede variar, cambiando así sus características intrínsecas: rango de apagado, velocidad, transmitancia visible, consumo eléctrico, durabilidad y color.

Apariencia y tintado.

El tintado de una ventana EC varía desde un claro amarillo verdoso a un azul oscuro (azul prusiano) en función del tipo de vidrio EC usado. En cualquier estado, la ventana permite una visión perfecta sin distorsiones o neblina.



Fig. 2-45. Vistas exteriores de prototipos de ventanas electrocrómicas, en su estado claro (izquierda) y tintado (derecha). Fuente [Ward 2006]<sup>36</sup>

<sup>36</sup> (Ward, Inkarojrit, & Yazdanian, 2006)

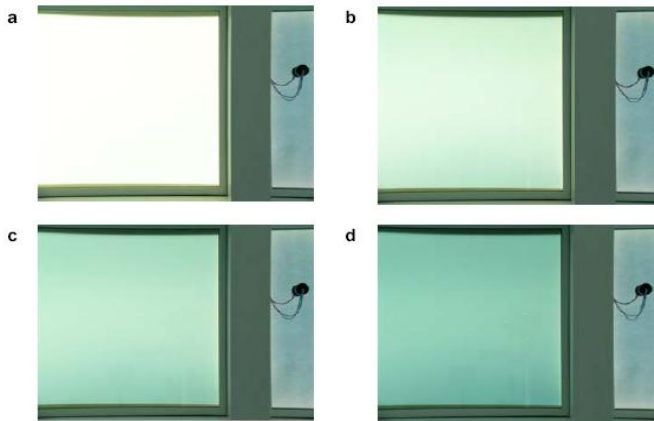


Fig. 2-46. Apariencia de la ventana EC cuando está encendido desde claro (a) a tintado (d). La parte desde donde se ejerce el potencial (eje superior e inferior) se oscurece más rápido, que las porciones intermedias. Fuente: [Ward 2006] <sup>37</sup>

### Características ópticas de los vidrios:

La transmitancia visible ( $T_v$ ) y el coeficiente de ganancia de calor (SHGC), varía dependiendo de la composición del material. El factor U, no se ve afectado por el tintado, permaneciendo siempre invariable. Generalmente, el rango entre encendido y apagado, varía según las condiciones ambientales exteriores:

La ventana electrocrómica es establecida en un doble panel de vidrio aislante, donde la capa de EC es aplicada en la superficie interior del vidrio externo. El rango de encendido, no está solo determinado por la capa EC, sino también por los paneles de vidrio aislante. El vidrio externo puede ser tintado o claro, y el interno puede ser de cualquier tipo (tintado, de baja emisividad...).

Se exponen los datos de un vidrio EC, cuando ambos vidrios exteriores son vidrios laminados sin tintar. Fuente: Larnpert (1995)<sup>38</sup>

$T_v=0.60-0.50$  para el estado apagado y  $T_v=0.25-0.10$  para el totalmente coloreado encendido). Niveles de transmitancia visible han sido observados, pero solo en capas muy especializadas.

SHGC=0.48-0.09

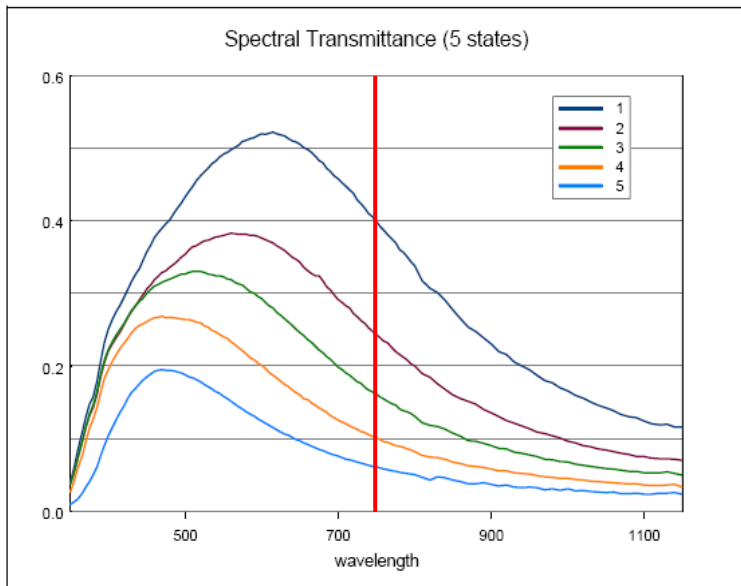
U factor=1.59-1.87 W/m<sup>2</sup>°C. Queda invariable, en el estado de encendido.

Factor de Sombra SC: 0.67-0.60 para el estado apagado, y 0.30-0.18 para el totalmente coloreado.

Un ejemplo espectral se muestra en la gráfica adjunta 2-11:

<sup>37</sup> Ibid

<sup>38</sup> (Larnpert, June 1995)



Gráfica 2-11. Transmitancia espectral de un vidrio Electrocrómico inorgánico (óxido de molibdeno), estado claro (a, b) y colorado (c, d) Fuente: Kraft (2006)

En la gráfica se observa como el valor de la transmitancia visible disminuye al aumentar la longitud de onda, y como el vidrio Electrocrómico se va volviendo opaco a la radiación infrarroja (línea roja), tanto en su estado activado como apagado. En los dos casos extremos (encendido y apagado), encontramos valores de transmitancia visible del 9% en estado claro, y de un 70% en estado coloreado.

#### Rapidez de encendido

Según expone Ward (2006)<sup>39</sup> la velocidad del encendido varía en función de la superficie y la temperatura exterior del vidrio (según los niveles de radiación solar, velocidad de viento y temperatura del aire).

- *Si el área de la ventana es pequeña, el vidrio se encenderá antes porque la distancia desde el cableado situado en la carpintería al centro del vidrio es menor.*
- *Para ventanas más grandes, el tiempo puede ser mayor. Podría reducirse aplicando una línea conductora adicional, permitiendo una distribución más rápida, entre el punto de aplicación de la potencia y la ventana.*
- *Si la superficie del vidrio exterior está caliente, bien debido a altas temperaturas exteriores o bien porque el sol está incidiendo sobre él, el EC se encenderá antes. Cuando está tintado el EC absorbe radiación solar, lo cual aumenta la temperatura de la superficie, y por tanto, su rapidez de encendido. Ante bajas temperaturas, o bien porque la radiación solar es baja, la rapidez de encendido desde totalmente claro a totalmente coloreado, es más lenta.*

<sup>39</sup> (Ward et al., 2006)

Ejemplos:

- $T > 10^{\circ}\text{C}$   $\longrightarrow$  tiempo  $< 6-7$  min. En buenas condiciones climáticas, el tiempo puede reducirse a 4 min.
- $-3^{\circ}\text{C} < T < -1^{\circ}\text{C}$   $\longrightarrow$  tiempo = 37 min, para  $T_v$  entre 0.56 y 0.13 y para transmitancias superiores el tiempo es mayor. Para bajas temperaturas y por tanto largos tiempos entre encendido y apagado, los ocupantes podrían necesitar algún tipo de oscurecedores, para bloquear el sol incidiendo en su campo de trabajo.

Rango de temperaturas

Se han realizado ensayos en laboratorios para oscurecimientos de ventanas EC, operando entre un rango de temperaturas entre  $-10^{\circ}\text{C}$  y  $95^{\circ}\text{C}$ , aunque como se ha visto anteriormente, el tiempo es mayor a bajas temperaturas. En términos reales, la superficie de un vidrio EC, nunca alcanzará los  $95^{\circ}\text{C}$ . SAGE, llegó a monitorizar temperaturas superiores a  $76^{\circ}\text{C}$  en el desierto de Arizona en lucernarios), y temperaturas superiores a  $65^{\circ}\text{C}$  en una fachada vertical al Sur, en California.

La superficie de un vidrio EC, puede llegar a alcanzar niveles altos de temperatura, debido la radiación solar absorbida cuando está tintado. Con un vidrio de baja emisividad y un vidrio aislante en su composición, la superficie interior del vidrio puede estar cerca de la temperatura ambiente interior. Sin un vidrio de baja emisividad, los vidrios EC, podrían causar cierta incomodidad.

Consumo eléctrico

Una potencia de bajo voltaje es requerida para encender un vidrio electrocrómico, y un muy bajo voltaje para mantenerlo en un estado constante, independientemente del nivel de tintado, todo ello en función del tipo de vidrio.

Ejemplos:

- el polímero laminado  $\text{WO}_3$ , requiere potencia solo para cambiar de estado, independientemente del nivel de oscurecimiento; sin ninguna potencia aplicada, el tintado del vidrio permanece al mismo nivel varios días.
- Las ventanas electrocrómicas de SAGE, requieren una potencia aplicada constante:
  - Si no se aplica potencia, el vidrio permanece en su estado claro. El nivel de tintado del estado claro puede variar según los modelos ( $T_v = 0.60-0.70$ ). La ventana EC puede dejarse apagada durante la noche.
  - Proceso de apagado encendido, la potencia varía entre 2.79 y 3.23  $\text{W}/\text{m}^2$
  - Mantenimiento en un estado: 0.75-1.61  $\text{W}/\text{ft}^2$



Diseño de ventanas con vidrios electrocrómicos

Una ventana electrocrómica está compuesta del vidrio aislante y el marco. Según Selkovitz(2006)<sup>40</sup>, la unidad del vidrio aislante electrocrómico está compuesta por:

- Lámina de vidrio exterior (donde la capa EC es depositada), que debe ser tintado y templado. Tendrá las conexiones eléctricas necesarias en los dos ejes paralelos.
- La lámina interior de vidrio puede ser de cualquier tipo. Si la capa EC no tiene la propiedad de baja emisividad, la superficie interior de este vidrio, debería serla.

A continuación mostramos diversas imágenes acerca de la colocación y cableado de un vidrio electrocrómico, todas ellas obtenidas de documentos publicados por el LBNL.

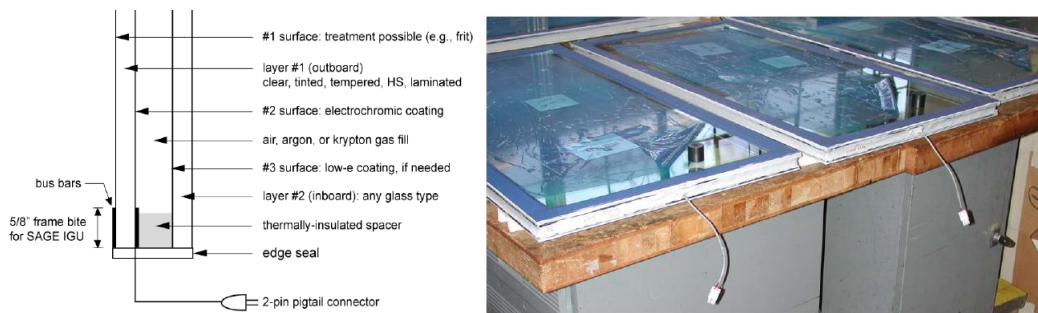


Fig. 2-47. Detalle de un vidrio electrocrómico. Fuente LBNL.

El producto está disponible en vidrios de dimensiones máximas de 1x1.5m, según datos obtenidas por la Casa SAGE, única empresa que comercializa vidrios electrocrómicos en EEUU.



Fig. 2-48. Montaje del vidrio EC usando un sistema exterior de muro cortina con carpintería. Fuente: LBNL

<sup>40</sup> (E. S. Lee, Selkowitz, Clear, DiBartolomeo, Klems, Fernandes, & et al., 2006)

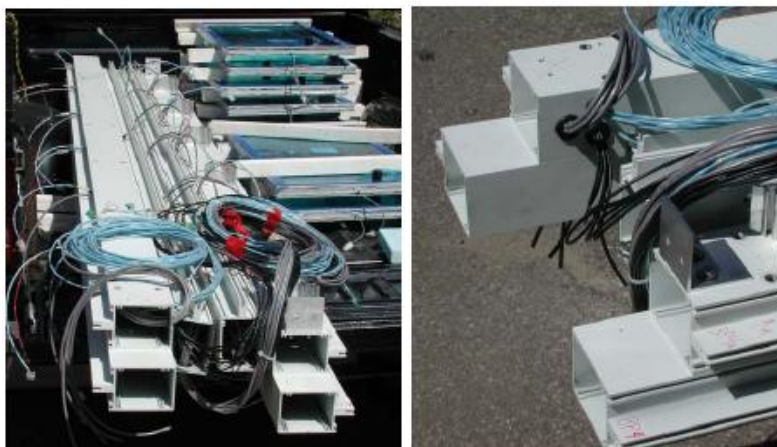


Fig. 2-49. Carpintería y cableado en el interior del marco usado en una ventana EC.  
Fuente: LNBL



Fig. 2-50. Controladores de ventanas electrocrómicas indicando estado 1(apagado) y estado 5 (activado y totalmente coloreado). Fuente: Platzer (2003).

### Coste estimado

Es difícil establecer a priori el coste de estos vidrios. Según contactos y conversaciones obtenidas con la casa SAGE Glass, el precio va en función del diseño del proyecto (volumen, tamaño, número de vidrios, configuración y elección de vidrios...).

Generalmente, se puede asumir que el coste de un sistema de ventana con el producto de SAGE Glass, es de 1 a 3 veces el coste de una ventana normal con un bajo emisor y un sistema de protección (mientras más compleja sea la protección, más bajo es el múltiplo). Si comparamos con un muro cortina de doble piel, el sistema de SAGE Glass, sería menor.

### Ventajas

Para ventanas EC con control de estado intermedio (disponible en los próximos años), los beneficios serían los siguientes:

- Significante aumento de vistas hacia el exterior si se comparan con ventanas convencionales con protecciones solares, cuando en situaciones críticas estas ventanas tendrían las persianas bajadas. Las características visuales son mejoradas en el vidrio EC, en su estado coloreado, en relación con las necesidades de confort de la persona en relación con la visión hacia el exterior.
- Reducir las necesidades de usar oscurecedores o elementos que den sombra.

- Ahorro significativo del uso de energía eléctrica, si la ventana está colocada y controlada adecuadamente. Estos ahorros son mayores en climas cálidos, y fachadas de vidrios EC están situadas a Sur, Este y Oeste.
- Reducción de la demanda energética, debido a la reducción de las ganancias solares cuando el vidrio está en su máximo estado de encendido.
- Reducción de la capacidad de la climatización debido a la reducción de las cargas energéticas.

Desventajas:

- Una ventana EC, a veces deberá combinarse para bloquear el efecto del sol directo con persianas tipo veneciana o similar en bajas temperaturas (tintado lento), grandes superficies y si la transmitancia visible del vidrio es superior a 0.03.
- Puede producir deslumbramiento, puesto que a veces el EC es insuficiente para controlar la luminosidad<sup>41</sup>.
- Según estudios no pueden proveer el control completo de la radiación directa, provocando efectos tales como deslumbramiento<sup>42</sup>.
- Largos tiempo de encendido y color final no uniforme<sup>43</sup>.

**2.4.4. VIDRIOS CROMOGÉNICOS. ESTADO DE LA INVESTIGACIÓN**

Desde aproximadamente los años 70 diversos investigadores entre los que destacan principalmente los del Laboratorio LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) y entre ellos Stephen Selkowitz, quien lidera a un grupo de arquitectos, ingenieros y científicos, han estudiado el comportamiento térmico y lumínico de los vidrios cromogénicos. Gracias a sus publicaciones nos han ofrecido una visión muy amplia de estos materiales.

En los siguientes párrafos se expondrá un resumen del estado de la investigación de estos tipos de vidrio que se han desarrollando gracias a los diversos proyectos de investigación, dando lugar a publicación de artículos de especial relevancia, tanto desde un punto de vista general como particular de estos tipos de vidrios.

Un amplio enfoque de la tecnología de estos vidrios, nos la han dado Cronin (1997)<sup>44</sup> y Lampert (1995)<sup>45</sup> quienes nos ofrecen una visión global de todos los tipos de vidrios cromogénicos existentes, tanto en periodo de investigación como comercializados. La clasificación anteriormente expuesta en el punto 2.3 ha sido extraída y tomada de dichos artículos. Éstos nos han permitido estudiar sus características principales y observar el comportamiento de estos tipos de vidrio, así como ayudarnos a profundizar en otros artículos que de modo más específico exponen otros investigadores.

---

<sup>41</sup> (Ward et al., 2006)

<sup>42</sup> (Chow, Li, & Lin, 2010)

<sup>43</sup> Ibid.

<sup>44</sup> (Cronin et al., 1999)

<sup>45</sup> (Larnpert, June 1995)

Los siguientes artículos y proyectos de investigación que a continuación se describen nos dan una visión muy pormenorizada de cada uno de los tipos de vidrios, no solo en cuanto a características, sino incluso de diversos ensayos físicos y estudios experimentales realizados, sin los cuales, nos hubiera resultado muy difícil avanzar. Entre otros informes destacamos el programa PIER (Public Interest Energy Research) en los artículos dirigidos por Lee, Eleanor (2006)<sup>46</sup>, y Lee, Eleanor S.; Selkowitz, Stephen E. (2006)<sup>47</sup> donde exponen la puesta en marcha de un vidrio electrocrómico y los prototipos de funcionamiento de este tipo de vidrios llevados a cabo para un completo estudio lumínico, consiguiendo dar una visión bastante amplia y específica del uso actual que conllevaría los vidrios electrocrómicos.

No podemos dejar de citar a Platzer (2004), en el informe realizado durante el desarrollo del proyecto SWIFT (Switchable Façade Technology) y su experimentación en fachadas en el Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE) y en el ENEA (Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development) con vidrios electrocrómicos y gasocrómicos, los cuales nos dan una visión crítica al compararla con el proyecto PIER por Eleanor y Selkowitz. Dicho proyecto, se considera de mayor interés por el alto nivel científico de publicaciones que ha alcanzado, en donde podemos incluir las de Michele Zinzi en el ENEA y del ISE entre otros. Todos estos artículos, exploran generalmente de un modo detallado el análisis lumínico, y el estudio sensorial de personas, pero dejan lagunas en lo relativo a un estudio energético: estudio de ganancias y pérdidas o consumo energético final. Aunque en ningún artículo de los hasta ahora analizados mide temperatura interior o transmisión de infrarrojos de onda larga y onda corta en el interior de un recinto, de modo que pueda analizarse la eficiencia energética de estos tipos de vidrio, se citan dichos artículos por ser los proyectos más importantes y realizados hasta la fecha sobre vidrios cromogénicos. Los estudios realizados de consumo pico realizados por el LBNL, son siempre referidos a iluminación. La única referencia encontrada hasta el momento ha sido la de los ensayos realizados por M.Rottmann (2007)<sup>48</sup>, en donde se mide, por primera vez en las referencias encontradas, la temperatura en el interior de la célula de ensayo como a continuación comentamos.

Los vidrios pasivos han tenido un menor desarrollo que los activos que describiremos a continuación. De los vidrios fotocromicos, actualmente la investigación está centrada en el estudio de finas láminas plásticas fotocromicas, aunque los problemas de prestaciones y de durabilidad, aún están por resolver, y no se han encontrado artículos técnicos de especial relevancia para su estudio. Por otra parte el estado de la investigación de los vidrios termocrómicos, hasta el momento, se ha reducido a la realización de ensayos y simulaciones en la fachada del Fraunhofer Institut<sup>49</sup> que se adjunta en el Anexo 1: artículos. Actualmente solo se ha encontrado una empresa que lo comercialice: Pleotint, del cual adjuntamos en el Anexo 6: la información cedida por ella.

---

<sup>46</sup> (E. S. Lee, Selkowitz, Clear, DiBartolomeo, Klems, Fernandes, & et al., 2006b)

<sup>47</sup> Ibid

<sup>48</sup> (Rottmann, Häusler, & Fischer, 2007)

<sup>49</sup> (Raicu et al., 2002)



Fig.2-51. Demostración del cambio de opacidad de una ventana de 100\*50 cm, a 20°C (transparente) y a 30°C (translúcido) al cambio de temperatura. Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung. Fuente: Alexandra Raicu (2002).

Por otro lado los vidrios cromogénicos activos, han sido y son hasta el momento objeto de una mayor investigación que los anteriormente descritos, destacando los vidrios gasocrómicos y los electrocrómicos en los que actuales investigaciones desarrolladas por el Fraunhofer Institute, LBNL y el ENEA, entre otros, avanzan en el desarrollo no sólo de nuevas capas más duraderas, sino de estudios de comportamiento energético, especialmente lumínico, de estos tipos de vidrio.

Destacamos los prototipos de ensayo realizados en el Fraunhofer Institute <sup>50, 51</sup> desarrollados durante el proyecto SWIFT, donde se compara un vidrio gasocrómico y otro electrocrómico, con el principal propósito de demostrar que las ventanas dinámicas no están tan lejos de ser comercializadas, así como en ganar experiencia para el manejo y control diario de dichos sistemas. El artículo concluye que con un gasocrómico en estado apagado se obtiene un vidrio mucho más parecido a las características de un doble acristalamiento común, por lo que puede resultar más conveniente, por ejemplo en invierno. La aceptación de las fachadas dinámicas en los tests y encuestas realizadas fue muy alta: 2/3 de los 27 participantes aceptó el sistema mientras que 1/3 prefería seguir con un doble acristalamiento y protecciones solares en los momentos de mayor luminosidad.



Fig. 2-52. Fraunhofer Institut. Freiburg. Fachada para testar ventanas gasocrómicas. Fuente: SWIFT Project.

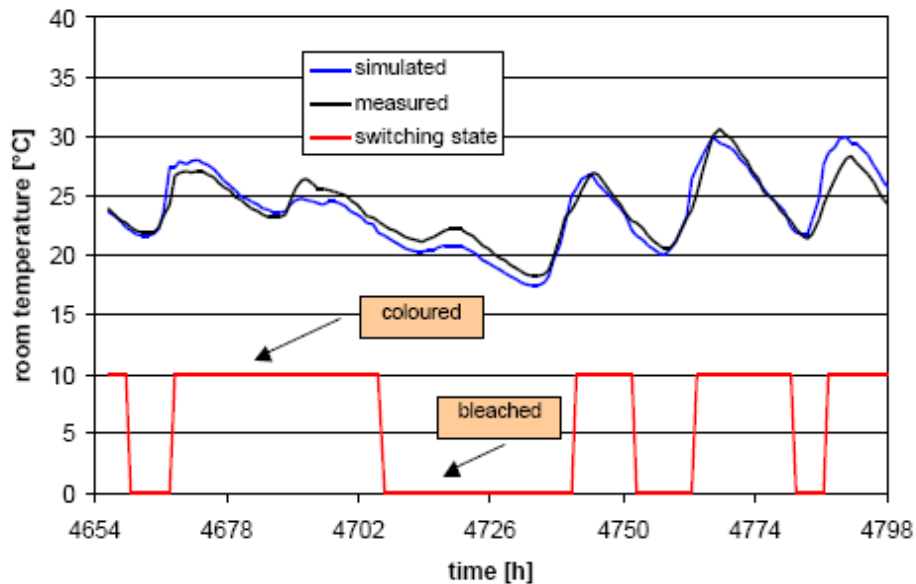
50 (Wittwer et al., 2004)

51 (Platzer, 2003)



Fig. 2-53. Vista interior de las ventanas gasocrómicas. Fraunhofer Institut. Freiburg. Fuente: SWIFT Proyect.

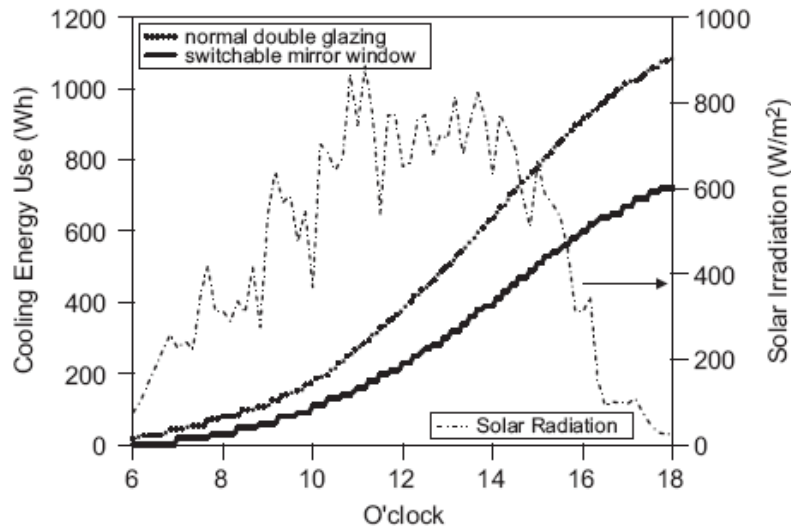
Este artículo hace referencia a otro que consideramos de vital importancia, (Platzer (2003)), ya que expone gráficas de mediciones de temperatura del aire de la habitación con fachada de vidrios gasocrómicos y mediciones de la carga energética anual para calefacción y aire acondicionado, pudiéndose observar como la carga de calefacción se reduce en un 19% con respecto a un vidrio de control solar, y en un 37.1% en cargas de aire acondicionado<sup>52</sup>. Un estudio interesante a remarcar es el estudio de la temperatura interior de una habitación frente a un vidrio gasocrómico, comparado con los ciclos de activación-desactivación del vidrio, tal y como se indica en la gráfica 2-12:



Gráfica 2-12. Estudio de una fachada con vidrio gasocrómico a sur usando la comparación de los datos simulados con la medición de los datos reales durante Junio de 2001. En rojo se muestran los estados de activación-desactivación del vidrio. Fuente: Platzer (2003).

<sup>52</sup> (Ver artículo [Platzer (2003)] en Anexo 1: artículos)

Otro artículo interesante de citar, es el del desarrollo de un prototipo de vidrio gasocrómico-reflectante (tipo espejo) realizado en el National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Japan<sup>53</sup>, por ser uno de los pocos que miden el consumo de aire acondicionado en el interior de un recinto con instalación de aire acondicionado comparado con el consumo de un doble vidrio común. El consumo total de energía tal y como muestra la gráfica 2-13 se redujo en un 34%.



Gráfica 2-13. Carga de aire acondicionado para un vidrio gasocrómico (línea continua) comparado con un vidrio doble común (línea de puntos), en función de la radiación solar y durante 12 h en agosto. Fuente: K. Yoshimura (2009).

La residencia en Houston estudiada por el LBNL EN según lo expuesto por Lee (2000)<sup>54</sup> fue originalmente construida como parte de un proyecto sobre el uso de la energía, patrocinado por el National Association of Home Builders Research Center (NAHB) y el U.S. Department of Energy (DOE) en colaboración con el National Partnership for Advancing Technology in Housing. Andersen Windows cedió la carpintería para los paneles de Sage Glass. En la foto de la derecha se muestran las ventanas en su estado más claro (sin tintar: vidrio inferior), y en su estado más oscuro (tintado: vidrio superior). La foto de la izquierda muestra las ventanas desde el exterior.



<sup>53</sup> (Yoshimura, Yamada, Bao, Tajima, & Okada, 2009)

<sup>54</sup> (E. Lee, Di Bartolomeo, & Selkowitz, 2000)

Fig. 2-54. Exterior e interior del prototipo ensayado. Fuente: LBNL.

Actualmente, se han desarrollado diversas investigaciones y prototipos acerca del empleo de vidrios electrocrómicos en oficinas. Se trata, de la colocación de vidrios electrocrómicos en unas salas de oficinas privadas de un edificio de oficinas en Oakland, California (EEUU) en la primavera del año 2000, mediante la implantación de un control capaz de ajustar la transmisión y luminosidad interior, para conseguir los requerimientos buscados de luminosidad, confort, refrigeración, iluminación y vistas, aunque no todos ellos puedan ser ejecutados a la vez. La Fig. 57, presenta cuando el sol incide en la habitación, y el vidrio electrocrómico está encendido a su más bajo nivel de transmisión, para controlar la luminosidad y la refrigeración. En el anexo 5 se exponen los datos de partida y el procedimiento del ensayo, así como los resultados obtenidos en las experimentaciones,<sup>55</sup>



Fig. 2-55. Interior del prototipo ensayado, antes de que el sol entre por la ventana, el vidrio electrocrómico está en su estado más transparente. Fuente: LBNL

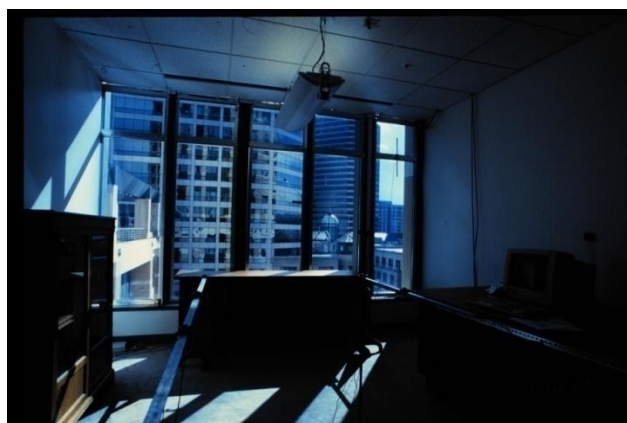


Fig. 2-56. Cuando el sol incide en la fachada, el vidrio se enciende aplicando una corriente eléctrica a su estado más oscuro, y la iluminación se enciende acorde a lo que necesite. Fuente: LBNL

---

55 Ibid



Por otro lado se han planteado y descrito, prototipos desarrollados de células de ensayo para el estudio de las propiedades lumínicas de los vidrios electrocrómicos como el edificio experimental denominado "Casa Inteligente" situado en el ENEA en Casaccia (Agencia Italiana para la Energía y el Medioambiente) en el Noroeste de Roma<sup>56</sup> desarrollado en el seno del proyecto SWIFT.

Aunque se trata de estudio lumínico, se analiza y expone el artículo, debido a la conversación que tuvo la autora de la tesis con uno de los autores, Michele Zinzi, y a la gran colaboración y ayuda cediendo y aportando cierta documentación, a la que sin su ayuda, no habría tenido acceso.

La habitación de ensayo está equipada con ventanas electrocrómicas suministradas por la casa Flabeg de tamaño 120x160cm, con orientación Norte y Oeste, con las siguientes características:  $T_v=50\%$  y  $15\%$  en transparente y coloreada;  $g=36\%$  y  $12\%$  respectivamente; Factor U:  $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Cada vidrio tiene 5 estados de coloración, establecidos en la siguiente tabla:

Tabla 2-VIII. Características de los vidrios utilizados.  
Datos procedentes de Michele Zinzi (2006).

GRADO DE COLORACIÓN	Transmitancia luminosa %	Transmitancia solar %
1	49.7	36.5
2	37.3	25.9
3	30.5	20.7
4	22.1	15.2
5	14.4	9.9



Fig. 2-57. De izquierda a derecha. Casa inteligente; vidrio electrocrómico encendido (totalmente coloreado y apagado); oficina de estudio. Fuente: Imágenes cedidas por Michele Zinzi.

<sup>56</sup> (M. Zinzi, 2006)

Los ensayos tuvieron lugar desde principios de Agosto a principios de Octubre, siendo el periodo más adecuado con respecto a la orientación y el recorrido solar, y el mejor para los 30 empleados del ENEA. Los ensayos tenían lugar cuando la iluminación natural de la habitación estaba producida únicamente por luz difusa. Más tarde, se notaba un aumento de la iluminación a través de la ventana Oeste, siendo necesarios protecciones solares para evitar el deslumbramiento. Los test finalizaban antes que la luz directa comenzara a golpear la mesa de trabajo. Desde que por la ventana Norte entraba solo luz difusa, se mantenía siempre transparente permitiendo al usuario cambiar la ventana Oeste.

Cada usuario tenía que rellenar un cuestionario, el cual pretendía reunir información concerniente al comportamiento del usuario en respuesta a las actuales condiciones de luminosidad en el que trabajaba. Los principales puntos eran: condiciones de confort, sistemas de control de los vidrios y percepción y/o alteración del ambiente exterior e interior.

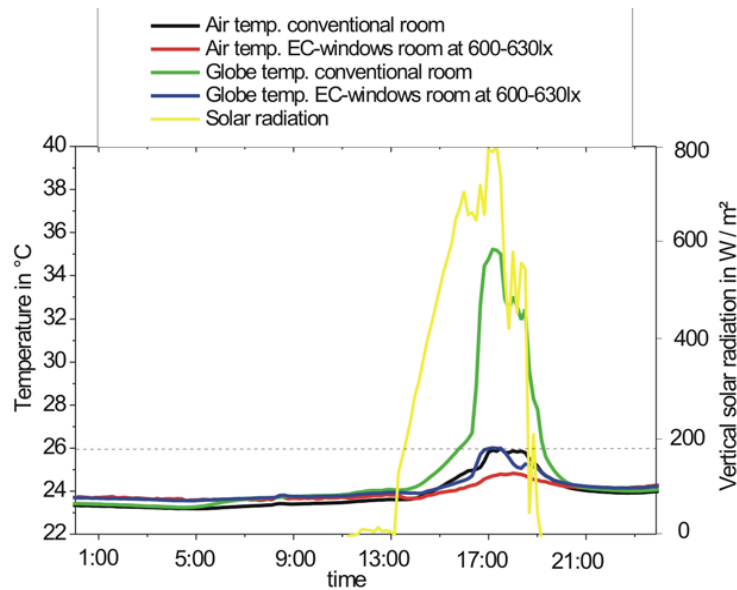
El cuestionario tenía que ser desarrollado en tres etapas: el primero cuando comienza el ensayo, en el que los vidrios estaban apagados o transparentes y sin protección solar, respondiendo el usuario al cuestionario cuando se hubiera acostumbrado a las condiciones ambientales de iluminación. Segundo, cuando el usuario decidiera modificar el estado del vidrio, incluyendo la protección solar, cuando encontrara que las condiciones luminosas no eran adecuadas. Tercera al finalizar el ensayo.

Los resultados del cuestionario muestran que los usuarios percibieron el sistema como una opción adecuada para asegurar un confort visual y proveer unas condiciones lumínicas uniformes. Las propiedades del sistema hicieron posible obtener condiciones uniformes cuando no había iluminación directa en el campo de visión del usuario. El tiempo de respuesta de los vidrios, desde su estado apagado a totalmente coloreado no satisfizo por igual los requerimientos del usuario, aunque si apreciaron una operación manual en vez de control automatizado. El cuestionario recoge como las personas se inclinan a personalizar su comportamiento con el fin de obtener las mejores condiciones de confort.

Resulta muy interesante en este punto citar la investigación realizada en el campus de Brandenburg Technical University (BTU)<sup>57</sup>, denominada la PASSYS cell, situada en la localidad de Cottbus (Alemania), por la realización de un análisis térmico, el único que he encontrado hasta el momento, en el que concluye que los vidrios electrocrómicos se asemeja a vidrios de control solar de distinto factor solar, tal y como se expone en la gráfica 2-14.

---

57 (Rottmann et al., 2007)



Gráfica 2-14. Comparación de las temperaturas obtenidas de la célula con vidrios convencionales y vidrios electrocromáticos. Fuente: M.Rottman (2007)

Todos estos artículos me han permitido elaborar, (Giménez Molina M.C. (2009))<sup>58</sup>, un artículo publicado en la revista DYNA, desarrollado a partir de los documentos citados anteriormente, explorando la contribución y optimización de nuevos tipos de vidrio de alta tecnología, a la mejora de la eficiencia energética general de superficies acristaladas. Se trata de la elaboración de un general estado del arte de los vidrios cromogénicos existentes, pero orientado al funcionamiento energético de estos tipos de vidrios, obviando su fabricación y composición desde el punto de vista químico, que es en lo que se centran principalmente la mayoría de los artículos comentados. El artículo concluye diciendo que:

*“ (...)por ser una vía en investigación, se considera de principal interés exponer los tipos con los que nos encontramos hasta el momento y su evolución en el mercado. Estas nuevas tecnologías, pueden ayudar a disminuir el efecto de las cargas térmicas, ya que como se sabe, la radiación infrarroja de onda corta es la culpable del calentamiento de los recintos interiores y del llamado efecto invernadero”<sup>59</sup>.*

Recientemente, Ruben Baetens (2010)<sup>60</sup> ha publicado un artículo sobre el estado del arte de los vidrios cromogénicos activos existentes en el mercado, orientado no desde la eficiencia energética, como exponía Giménez Molina (2009), sino desde el punto de vista del análisis de los distintos componentes químicos que se pueden usar para su fabricación y su diferencia entre las distintas casas comerciales. Uno de los puntos importantes por lo que se ha de destacar este artículo es por ser el primero que publica una tabla de los distintos fabricantes de vidrios cromogénicos activos existentes en el mercado internacional hasta el momento. De dicha tabla se han extraído los valores más relacionados con la eficiencia energética, omitiendo

58 (Gimenez Molina, 2009)

59 Ibid.

60 (Baetens, Jelle, & Gustavsen, 2010)

los componentes químicos de distintos productos, me han permitido re-elaborar nuevas tabla compuesta por 7 columnas exponiendo de izquierda a derecha el tipo de vidrio, datos del productor comerciante, valor U, transmitancia visible, factor solar, tamaño máximo con el que se comercializa y otras especificaciones, a partir de los datos que facilitaba la tabla del artículo y completando y actualizando los datos a partir del contacto con las casas comerciales. (Tablas 2-IX, X, XI y XII).

Tabla 2-IX. Tabla de características comerciales vidrios electrocrómicos. Fuente: elaboración propia.

TIPO VIDRIO	PRODUCTOR	U (W/m <sup>2</sup> K)	Tv	g	T.MAX	ESPEC
<b>ELECTRO CRÓMICO</b>	SAGE glass SAGEElectrochromics ,Inc., One SageWay,Faribault,M N55021, USA Tel.: +18777243321; fax: +15073330145 sales@sage-ec.com, http://www.sage- ec.com/	0.28/0.29	0.62- 0.035	0.48- 0.09	>180x150 cm	Consumo energético: 2.8 W/m <sup>2</sup> Tiempo de respuesta:3 -5 min
	EControl- GlasGmbH&Co.KG, Glaserstr.1, 93437FurthimWald, GERMANY Tel.: +499973858330; fax: +499973858331 info@econtrol- glas.de, www.econtrol-glas.de	1.1	0.50-0.15	0.36- 0.12	120x200	Consumo energético <0,5 Wh/m <sup>2</sup> /ciclo Tiempo de respuesta: 12 min.
	GESIMATGmbH, Koepenicker Str.325,12555Berlin, GERMANY Tel.: +493047389251; fax: +4947389252 www.gesimat.de <sup>61</sup>	-	0.70-0.08	0.55- 0.17	120x80	Consumo energético: 0.04 Wh/m <sup>2</sup> Tiempo en ciclo complete de coloración: 20 min.
	ChromoGenicsAB, Märstagan4, SE- 75323,Uppsala, SWEDEN Tel.: +46184300430 info@chromogenics.b e, www.chromgenics.se	-	-	-	-	No están en venta. En Mercado a través de <i>MC Helmet visor</i> a través de <i>LAZER helmets.</i>
	SAINT GOBAIN SEKURIT Viktoriaallee 3-	-	0.19-0.01	-	1200x1500 mm	Consumo energético: <0.2Wh/cicl

<sup>61</sup> (Kraft & Rottmann, 2009)

2.-Estado de la Técnica y de la Investigación

	5,52066Aachen, GERMANY Tel.: +492419472604 contactSekurit@Saint- Gobain.com, <a href="http://www.sekurit.com">www.sekurit.com</a>					o/m2 Tiempo: 30- 90s. Solo para coches
	SPAIN Joaquin Lancis Clavero Spain & Portugal Sales Manager LA VENECIANA S.A. - GETAFE Confianza, 4, P.I Los Olivos 28906 Getafe +34 (91) 397 22 67 joaquim.lancis@saint- gobain.com <a href="http://www.quantumglass.com">www.quantumglass.com</a>	1.08	0.60-0.03	0.40- 0.06	2500x1500 mm	Max tintado: 5 min. Cada estado de 60 a120 seg. en función del tamaño.

U=Transmitancia Térmica  
Tv=Transmitancia visible  
g=Factor solar  
T.MAX=Tamaño máximo  
ESPEC=Otras especificaciones

Tabla 2-X. Tabla de características comerciales vidrios de partículas en suspensión. Fuente: elaboración propia.

TIPO VIDRIO	PRODUCTOR	U (W/m <sup>2</sup> K)	Tv	g	T.MAX	ESPEC
<b>PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN (SPD)</b>	Commercially available suspended- particle- ResearchFrontiersI nc., 240 CrosswaysParkDriv e, Woodbury, 11797NY,USA Tel.: +15163641902; fax: +15163643798 <a href="http://www.refr-&lt;br/&gt;spd.com">http://www.refr- spd.com</a>	-	>0.50- <0.01	0.06	Ancho máximo 150 cm	Consumo energétic o: 0.06 W/ft2 Velocidad de encendid o: segundos
	Smart Glass International, Ltd., Unit 21,CookstownIndu strial Estate, Tallaght,Dublin24,I RELAND Tel.: +35314629945; fax: +35314629951 <a href="mailto:info@smartglassint">info@smartglassint</a>	0.24	0.25- 0.01	0.43- 0.37	990x2800 mm	-

	ernational.com www.SmartGlassin ternational. com					
	CRICURSA CristalesCurvadosS .A., Cami deCanFerrans/n,Po l. Industrial ColldeLaMaya,0840 3 Granollers (Barcelona),SPAIN Tel.: +34938404470; fax: +34938401460 B 1.290.276- 0.0120.269- 0.132- 0.39-0.23 cricursa@cricursa.c om, www.cricursa.com	1.29	0.17- 0.004	0.35- 0.21	00x300cm 2	<5W/m <sup>2</sup>
	InnovativeGlassCor poration, 130 NewtonRoadPlainvi ew,NY, USA Tel.: +15167771100; fax: +15167771106 info@innovativegla sscorp.com, www.innovativegla sscorp.com	0.5,0.28	0.5- 0.01	0.8- 0.47	260_488 cm2	Tiempo de respuesta : 5 seg. Consumo energétic o: 0.18 W / Sq Ft

U=Transmitancia Térmica  
Tv=Transmitancia visible  
g=Factor solar  
T.MAX=Tamaño máximo  
ESPEC=Otras especificaciones

Tabla 2-XI. Tabla de características comerciales vidrios de cristal líquido. Fuente: elaboración propia.

TIPO VIDRIO	PRODUCTOR	U (W/m <sup>2</sup> K)	Tv	g	T.MAX	ESPEC
<b>CRISTAL LÍQUIDO (LCD)</b>	ARCHITECTURAL GLASS PROJECTS PTY LIMITED 9 Liberty Road, Huntingwood NSW 2148 Australia Telephone 02 9671 0000 • Facsimile 02 9672 1951 Email • sales@agpgroup.co m.au • www.agpgroup.co m.au	-	-	-	2750mm x 990mm.	-

2.-Estado de la Técnica y de la Investigación

	<p>Switch Lite 3211 La Cienega Boulevard, Los Angeles, California 90016 T. 310. 815.4999 F. 310. 815.4990 E. sales@pulpstudio.com http://www.switchlite.com/home.html</p>	-	0.75-0.075	-	38"x 114"	Consumo energético: 3.5W/m <sup>2</sup> Tiempo de respuesta : 1/1000 seg.
	<p>Privalite Saint-Gobain Cristalería, S.A. Pº de la Castellana, 77 Azca - 28046 Madrid Tel.: 91 397 20 00 Fax: 91 397 26 46 <a href="http://www.privalite.com">www.privalite.com</a> <a href="http://www.quantumglases.com">www.quantumglases.com</a></p>	2.6 a 1.3	0.23	0,59	1000 mm x 3000mm-2000x3000mm.	5 W/m <sup>2</sup>
	<p>Dream Glass C/ Cañada, 15.28860Paracuellos del Jarama, Madrid, SPAIN Tel.: +34916584245; fax: +34916581451 <a href="http://www.dreamglass.es">www.dreamglass.es</a></p>	-	0.62-0.035	-	120x300cm	Consumo. 10W/m <sup>2</sup> . Velocidad : 40 m/s
	<p>LTI smart glass 175 CrystalstraatPOBox,2305 Lenox, MA01240,USA (LC)-Bulletproof Tel.: +14136375001; fax: +14136375004 <a href="http://ltisg.com/3.0/switchable.php">http://ltisg.com/3.0/switchable.php</a></p>	-	-	-	-	-
	<p>Smart Glass International, Ltd., Unit 21, Cookstown Industrial Estate, Tallaght, Dublin 24, IRELAND Tel.: +35314629945; fax: +35314629951 info@smartglassinternational.com <a href="http://www.SmartGlassin">www.SmartGlassin</a></p>	1.3	0.75-0.67	-	1.156x3.2	Velocidad de encendido: 1 seg. Consumo : 5W/m <sup>2</sup> .

	ternational.com					
	InnovativeGlass Corporation, 130 NewtonRoadPlainville, NY, USA Tel.: +15167771100; fax: +15167771106 info@innovativeglasscorp.com, www.innovativeglasscorp.com	0.5-0.28	0.77-0.58	0.8-0.65	260_488 cm2	Consumo energético: 1.44 W / sq Ft Tiempo: 0.4seg.

U=Transmitancia Térmica  
 Tv=Transmitancia visible  
 g=Factor solar  
 T.MAX=Tamaño máximo  
 ESPEC=Otras especificaciones

Tabla 2-XII. Tabla de características comerciales vidrios termocrómicos. Fuente: elaboración propia.

TIPO VIDRIO	PRODUCTOR	U (W/m <sup>2</sup> K)	Tv	g	T.MAX	ESPEC
<b>TERMOCRÓMICOS</b>	PLEOTINT L.C.C., 7705 WestOlive Road, WestOlive, MI 49460, USA Tel.: +16167388540; fax: +16167387661 info@pleotint.com, www.pleotint.com	1.34	0.54-0.04	0.45-0.08	Ancho max 1.60m.	Aún no está a la venta. Proyectos de demostración Vidrio pasivo: no consume electricidad.

U=Transmitancia Térmica  
 Tv=Transmitancia visible  
 g=Factor solar  
 T.MAX=Tamaño máximo  
 ESPEC=Otras especificaciones



## **2.4.5. VIDRIOS CON CÁMARA DE AGUA**

### **2.4.5.1. ESTADO DE LA TÉCNICA**

Hasta el momento se han estudiado una parte de los vidrios dinámicos, los denominados vidrios cromogénicos. Debido, a que los vidrios estudiados hasta el momento, no ayudan lo suficiente en conseguir el confort deseado con un bajo consumo energético, se ha encontrado otro tipo de acristalamiento, que los podríamos incluir dentro de los vidrios dinámicos o inteligentes, pero en este caso, el confort térmico se consigue gracias a la circulación de un fluido al paso por su cámara, que en este caso es el agua. Se trata de los vidrios con fluidos en la cámara. De ese tipo, aún no hay constancia en la literatura científica de su eficiencia energética real, por lo que conviene su estudio pormenorizado.

El objetivo fundamental de este tipo de vidrio consiste en el estudio de un acristalamiento activo formado por dos paneles de vidrio laminado y cámara de aire y agua en circulación, proporcionando el control de la carga térmica y el confort térmico, al absorberse la radiación infrarroja en la cámara de agua.

Se trata de un cerramiento constituido por láminas transparentes o translucidas que forman una cámara por la que puede circular o permanecer en reposo un fluido (aire, agua, etc....) que dependerá de las necesidades de captación solar, calefacción o refrigeración propias de cada situación concreta a través del tiempo. Esta cámara estaría conectada a un circuito impulsado por una bomba que accionada intermitentemente por un sistema domótico, recirculará el fluido correspondiente por dicha cámara.

Este cerramiento permitiría optimizar la captación solar en invierno, por ejemplo, con aire en reposo en la cámara. Igualmente neutralizará las pérdidas térmicas recirculando, por ejemplo, agua caliente por la misma. El sobrecalentamiento en verano, se neutralizaría recirculando, por ejemplo, agua fría por la cámara.

Este cerramiento también permite controlar la iluminación natural del edificio mediante la recirculación de diferentes fluidos por la misma, por ejemplo con agua con diferentes coloraciones.

Este dispositivo permite en teoría un máximo ahorro energético de climatización al explotar tanto las características bioclimáticas del edificio, optimizando la captación solar beneficiosa, como las tecnologías de captación solar térmica, aprovechando en ciclo nocturno la energía térmica captada por el día. Igualmente permitiría explotar las posibilidades de un sistema domótico inteligente que gestione los fluidos circulantes por la cámara para la mejor eficiencia energética del edificio.

El intercambio de radiación entre un gas y una superficie que transfiere calor, como ya se ha dicho, es muy compleja. A diferencia que la mayoría de los cuerpos sólidos, en muchos casos los gases son transparentes a la radiación. Se sabe que el agua bloquea el paso de los infrarrojos en mayor medida que el vidrio. La influencia de la lámina de agua en un acristalamiento puede ser beneficiosa al absorber el agua más radiación infrarroja que el vidrio, disminuyendo la radiación total que incide y que penetra al interior del espacio, reduciendo la temperatura que alcanza la temperatura de la habitación, pudiendo ser beneficioso para verano.

Por ello, se plantea poner en juego de una segunda variable. Se trata no solo de introducir agua a temperatura ambiente, sino agua a distinta temperatura, de modo que pueda radiar el calor o el frío hacia el interior de del recinto, logrando de ese modo una temperatura constante.

El U de un doble vidrio como ya se sabe es de  $2.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ , llegando a un factor U de  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . El agua sin circulación, estancada, lograría únicamente la absorción de la radiación infrarroja, que una vez calentada, la radiaría al interior, siendo éste un inconveniente en verano. Al recircular el agua, al circular, se lleva consigo todo el exceso de calor o frío almacenado, consiguiendo disminuir de ese modo el consumo energético en el interior de la vivienda.

El primer antecedente documentado del presente vidrio lo encontramos en 1973 con la compañía inglesa Pilkington Brothers Ltd, quien patenta el primer acristalamiento que incluía una cámara con agua en circulación (Improvements in or relating to liquid filled double glazed units)<sup>62</sup>. La invención consistía en una unidad de doble acristalamiento formada por dos láminas de vidrio, u otro material transparente a la luz, unidas entre sí mediante un bastidor, formando una cámara entre ellas rellena de líquido. El líquido puede presentar propiedades variables de transmisión de la luz, incorporando una suspensión de partículas cuya orientación puede ser modificada por aplicación de un potencial eléctrico.

Entre los años 1982-85, el ingeniero inglés F.B MaKee patenta en Europa y en EEUU un sistema de acristalamientos con cámara de agua en circulación para mejorar el rendimiento térmico de las ventanas (Improvements in or relating to windows)<sup>63</sup>. El cerramiento es de aplicación en edificios con grandes superficies acristaladas expuestas a la radiación solar. En verano, el agua amortigua la energía infrarroja y el calor que proviene de la radiación solar, pero no bloquea la entrada de luz.

Tal como se muestra en el gráfico a continuación, el sistema consistía en un circuito primario, que asiste a un circuito secundario en cada nivel de la fachada, formada por paneles de vidrio (A - I). A través de los paneles de vidrio circula un líquido intercambiador de calor que es bombeado desde el depósito (11), situado en la parte inferior, a cada planta del edificio. Cada nivel de planta cuenta con una bomba auxiliar (17), un intercambiador de calor (21), un vaso de expansión (20) y un pequeño acumulador de agua caliente (18), que permite que ésta pueda ser reenviada a otras partes del edificio. El circuito principal está asistido por ventiladores (22) en la cubierta, para disipar el calor acumulado por el líquido, antes de que éste retorne al depósito.

---

<sup>62</sup> Patente FR 2176916. Improvements in or relating to liquid filled double glazed units. Pilkington Brothers. 1973

<sup>63</sup> Patente US 4561221. Improvements in or relating to windows. F.B MaKee. 1985

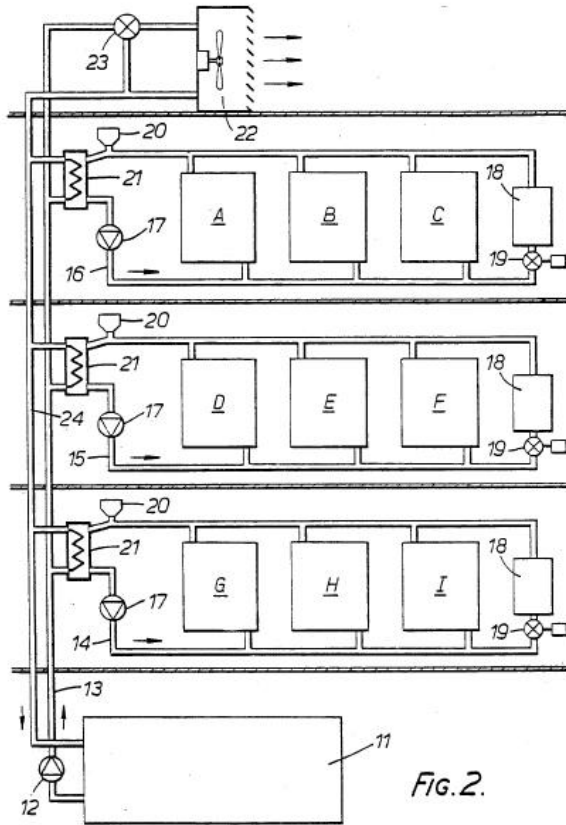


Fig. 2-58. Gráfico del documento de patente US456122. Improvements in or relating to windows. F.B MaKee. 1985. Fuente: [www.patentstorm.com](http://www.patentstorm.com)

Posteriormente, Makee crea la empresa Mckee Fluidized Glazing & Cladding Company (MFG&C) para la comercialización del sistema. El cerramiento permite que una parte importante de la energía solar incidente pueda ser reflejada al exterior o reenviada a otras partes del edificio. El objetivo es reducir el consumo energético asociado a la calefacción o la refrigeración del edificio. Otra versión del mismo consiste en disponer en paralelo un segundo acristalamiento doble en el lado exterior y separado del primero por una cámara de aire, de forma que aumenta la capacidad aislante del cerramiento.



Fig. 2-59. Prototipo de acristalamiento con cámara de agua (1.5 x 2.6 m). Realizado por MFG&C y Vegla glassworks (Alemania). *Architectural visions for Europe Exhibition*, Norman Foster. Fuente: [www.mckeefluidizedglazing.co.uk](http://www.mckeefluidizedglazing.co.uk)

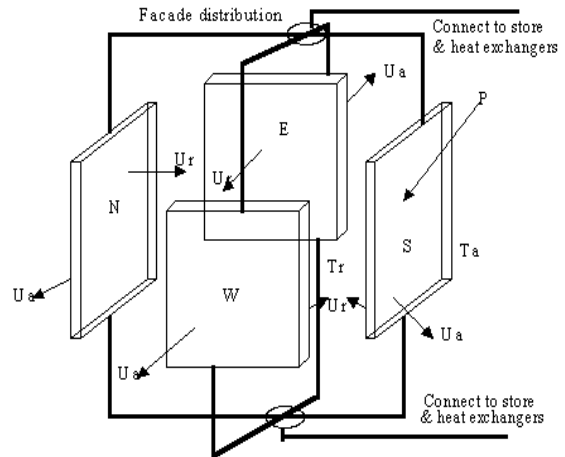


Fig. 2-60. Esquema de conexión de las fachadas N, S, E y O. Fuente: [www.mckeefluidizedglazing.co.uk](http://www.mckeefluidizedglazing.co.uk)

En 1988, el ingeniero alemán H. Walter patenta un sistema de ventana compuesta (Composite Window)<sup>64</sup>, que consiste en al menos dos o más láminas de vidrio o plásticas con cámaras con fluido que forma parte de un circuito cerrado. El objetivo de la invención es el correcto empleo de la energía solar y eliminar el exceso de luz y calor del interior.

Hacia 2007 se funda la empresa de base tecnológica Intelliglass<sup>65</sup>, creada por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica, de la Universidad Politécnica de Madrid, en el 2007, compuesta principalmente por ingenieros y un arquitecto, a partir de la patente ES2304871A1, denominada: Cerramientos transparentes o translúcidos activos con capacidad de gestión energética. Se trata de un cerramiento inteligente, que permite regular la iluminación y bloquear la entrada o salida de calor mediante una envolvente isoterma que incorpora un fluido en circulación de elevada capacidad calorífica.

La novedad de la invención reside en que incorpora en el bastidor del panel acristalado, un dispositivo reductor de la presión hidrostática que está conectado a la cámara. En palabras de sus propios autores, "el dispositivo reductor de la presión hidrostática permite reducir los espesores de las láminas que contienen el líquido, y con ello, su coste y su peso".

En su sistema, denominado RadiaGlass, el elemento emisor es una superficie de vidrio, por lo que puede aplicarse en la fabricación de muros cortina, particiones interiores, o cubiertas acristaladas. Los tubos por donde circula el agua se integran

<sup>64</sup> Patente DE 3716563. Composite Window. H. Walter. 1988

<sup>65</sup> IntelliGlass SL. <http://www.intelliglass.com/>. Ver patente en Anexo 2.

en la perifería de los paneles acristalados. Mediante una bomba de circulación el agua es impulsada por un circuito cerrado y pasa, antes de llegar a la cámara del acristalamiento, por un intercambiador de calor que permite disminuir o elevar su temperatura.

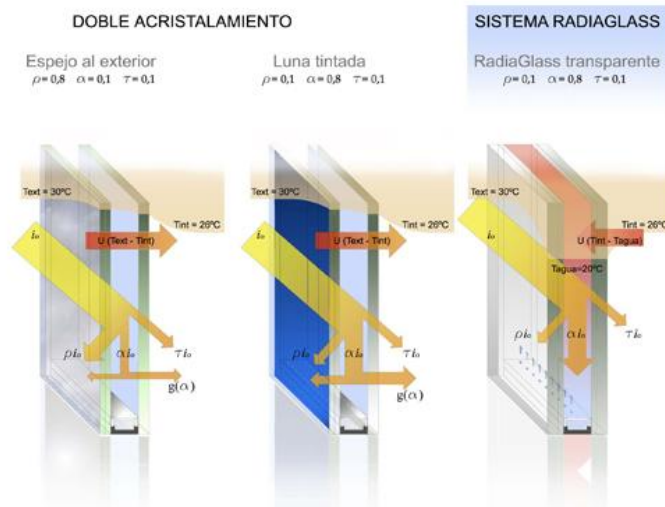


Fig. 2-61. Gráfico comparativo de análisis del flujo de la energía, entre un doble acristalamiento convencional, y un acristalamiento con el sistema Radiaglass. Fuente: [www.intelliglass.com](http://www.intelliglass.com)

La instalación se compone de dos circuitos. El circuito primario está formado por una bomba de circulación y una fuente de energía para calentar o enfriar agua. El secundario distribuye el agua a los vidrios interiores o los de fachada, y emplea caudales de circulación del agua por debajo de 0.1 l/s. Los fluidos de los dos circuitos no se mezclan, y la transferencia de energía se realiza a través de un intercambiador de calor.

La fuente de energía puede ser una caldera, una bomba de calor o paneles solares térmicos. También puede emplearse un intercambiador geotérmico, de forma que, tanto en invierno como en verano, el agua es enfriada o calentada al discurrir por las tuberías enterradas.

Producción de energía    Intercambio de calor    Circulador    Divisiones Interiores    Fachadas

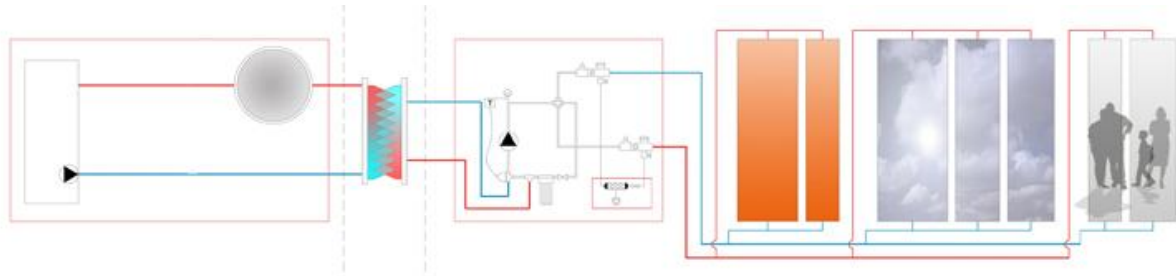


Fig. 2-62. Gráfico de funcionamiento del sistema Radiaglass. Fuente: [www.intelliglass.com](http://www.intelliglass.com)

Una de las futuras líneas de investigación que apunta la empresa Intelliglass es explorar cómo aprovechar la domótica para la aplicación de su sistema y la mejora de la climatización interior del edificio, pero hasta el momento, no se conoce ninguna publicación al respecto.

En el anexo 6: vidrios dinámicos se incluye informe de descripción de los productos Intelliglass. Aplicaciones y método de cálculo simplificado.

Otra de ellas, un ingeniero en Valencia, que ha desarrollado un sistema de oscurecimiento del vidrio con fluidos, denominado Softproject. La información detallada de este sistema se puede encontrar en la página web: <http://www.sofproject.com/index.htm>.

Recientemente se ha presentado en el Registro de la Oficina Española de Patentes y Marcas con fecha 8 de marzo de 2010 con referencia P201030328 y título: CERRAMIENTO PARA EL CONTROL DE LAS CARGAS TÉRMICAS DE EDIFICIOS, cuyo resumen adjuntamos a continuación y descritas en las imágenes 2-63 y 2-64.

*"Cerramiento para el control de las cargas térmicas de edificios que está formado por al menos un elemento de cerramiento fijado a la estructura del edificio, comprendiendo a su vez el elemento de cerramiento dos paneles separados entre sí que están sellados perimetralmente componiendo una cámara por la que circula un fluido. Adicionalmente, el cerramiento tiene un circuito complementario por el que circula el fluido, y con el cual intercambia calor, El circuito complementario conecta con la cámara del elemento de cerramiento mediante conductos de vaciado y llenado. La fijación del elemento de cerramiento a la estructura del edificio se realiza por medio de fijaciones puntuales, las cuales incorporan en su interior los conductos de vaciado y llenado de la cámara del elemento de cerramiento"<sup>66</sup>.*

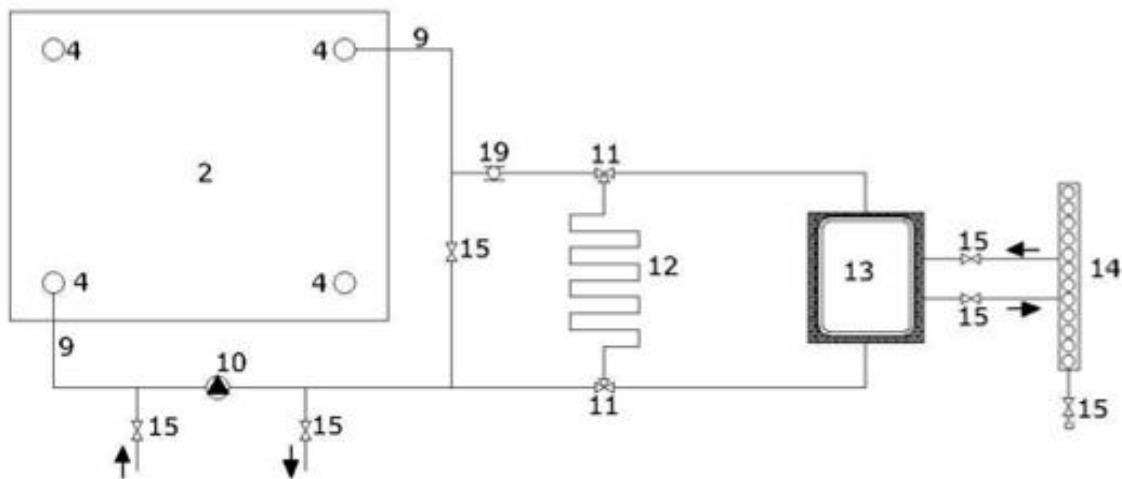


Fig. 2-63. Esquema general del cerramiento con su circuito complementario para circulación de fluido, con control manual de éste. Patente: nº P201030328.

<sup>66</sup> Patente nº P201030328. Investigadores: Lauret Aguirregabiria, Benito; Gimenez Molina, Carmen; Ovando Vacarezza, Graciela. Se adjunta patente presentada en el Anexo 2: Patentes.

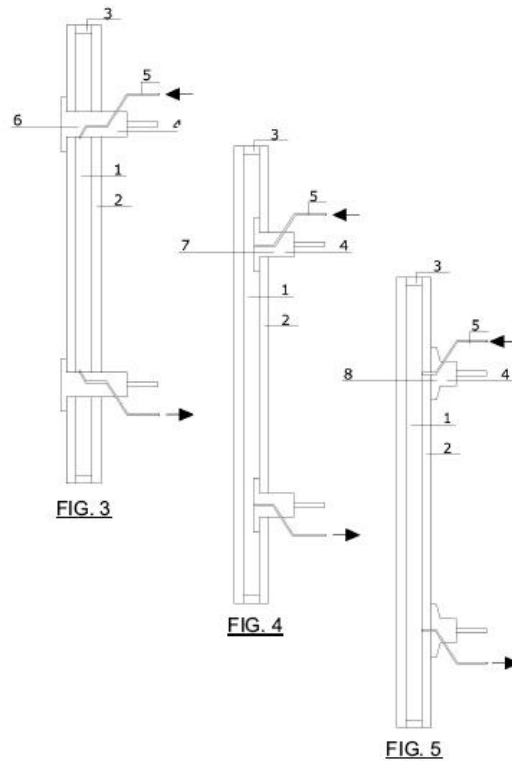


Fig. 2-64. La figura 3 es una sección transversal que muestra una realización particular de las fijaciones puntuales del elemento de cerramiento objeto de la presente invención. La figura 4 es una sección transversal que muestra una realización alternativa de las fijaciones puntuales del elemento de cerramiento. La figura 5 es una sección transversal que muestra otra realización alternativa de las fijaciones puntuales del elemento de cerramiento.

Fuente: Patente: nº P201030328.

La presente invención se diferencia de esta última en que permite el vaciado total del fluido líquido optimizando la captación solar invernal. Permite además el llenado directo con otro fluido frío o caliente desde el correspondiente depósito adaptándose a las necesidades del momento.

Finalizamos el estado de la técnica con la elaboración de una tabla resumen realizada a partir de las características de todos los vidrios dinámicos analizados, la cual nos servirá de base para la elaboración de las conclusiones que a continuación se exponen.

La tabla está compuesta por 7 columnas donde se exponen los distintos vidrios dinámicos analizados y por 8 filas donde se exponen las diversas características principales y su comportamiento que nos ayudan a diferenciar unos de otros.

Tabla 2-XIII. Tabla comparativa de vidrios dinámicos. Fuente: realización propia.

<b>VIDRIOS INTELIGENTES</b>							
<b>CONTROL ACTIVO</b>					<b>CONTROL PASIVO</b>		
<b>TIPO</b>	<b>SPD</b>	<b>LCD</b>	<b>EC</b>	<b>GASO CRÓMICO</b>	<b>CAMARA AGUA</b>	<b>FOTO CRÓMICO</b>	<b>TERMO CRÓMICO</b>
<b>COMPONENTE</b>	Partículas en suspensión	Cristal líquido	Material electrocrómico	Gas hidrógeno	Agua u otros fluidos activos	Haluros metálicos	Gel termocrómico
<b>AGENTE</b>	Electricidad				Agua / Electricidad	Luz	Calor
<b>EFECTO</b>	Claro-oscuro	Opaco-transparente	Claro-oscuro	Claro-oscuro	Claro-oscuro en función del fluido.	Claro-oscuro	Opaco-transparente
<b>¿CUANDO ES TRANSPARENTE?</b>	Encendido	Encendido	Apagado	Apagado	-	-	-
<b>ESTADO DE TRANSICIÓN ENTRE ENCENDIDO-APAGADO</b>	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI
<b>APLICACIÓN DE VOLTAJE PARA MANTENER EL ESTADO</b>	NO	NO	SI	NO	No corresponde	No corresponde	No corresponde
<b>TRANSMITANCIA</b>	0.22-0.05 a 0.57-0.12.	0.22-0.05 a 0.57-0.12.	0.5-0.7 a 0.02-0.25	0.10-0.59	En experimentación.	83%-33%	80%-10%
<b>FACTOR U</b>	Dependiendo del tipo de vidrio usado. No varía en la transición.				Depende de la temperatura y del caudal.	En experimentación	En experimentación

#### 2.4.5.2. ESTADO DE LA INVESTIGACIÓN

##### **SOBRE LA APLICACIÓN DEL SISTEMA EN LA ARQUITECTURA DE INVERNADEROS DE VIDRIO**

Existen artículos de investigación publicados sobre la aplicación de acristalamientos activos climatizados por agua y su aplicación en la arquitectura de invernaderos, siendo su estudio interesante tratar por ser uno de los primeros antecedentes realizados en vidrios refrigerados por agua. Tal y como comenta Damagnez (1981)<sup>67</sup>, *“Es esencial que un invernadero proporcione el máximo ambiente productivo para el mínimo gasto de energía, tanto en calefacción como refrigeración”*.

Un ejemplo destacable y la primera investigación sobre este tipo de vidrios ha sido la labor de los investigadores Damagnez, Van Bavel y Sadler (Estación

<sup>67</sup> (Van Bavel, Damagnez, & Sadler, 1981)



Experimental de Agricultura de la Universidad de Texas, EEUU) que en 1981 realizaron una investigación sobre la conservación de la energía en invernaderos (Damagnez, Van Bavel y Sadler, 1981), en el que se propone un sistema de cerramiento acristalado con cámara de agua en circulación, que sería particularmente eficaz si la instalación estuviera asistida por un intercambiador de calor que empleara aguas subterráneas como sistema de reserva de calor (geotermia). En el artículo se analizan detalladamente los problemas y ventajas del cerramiento acristalado con cámara de agua en circulación, mediante un modelo numérico. Los cálculos basados en ensayos preliminares sugieren que, para un determinado volumen de líquido activo por superficie invernadero, se pueden alcanzar ahorros considerables tanto en calefacción como en refrigeración.

Contemporáneamente, entre los años 1980 y 1981, se inicia una investigación dirigida por Chiapale (Estación de Bioclimatología del Instituto Nacional de Investigación Agrónoma de Francia), Van Bavel y Sadler, que por su interés para el presente trabajo se describe a continuación (Chiapale, Van Bavel y Sadler, 1983)<sup>68</sup> en el que se presenta una comparativa entre el rendimiento real de un invernadero con cerramiento de vidrio climatizado por agua en circulación y el de un invernadero con cerramiento acristalado convencional. Posteriormente se comparan los resultados reales con los obtenidos a partir de un modelo de simulación.

El ensayo comparativo se realizó por la Estación de Bioclimatología del Instituto Nacional de Investigación Agrónoma de Francia en colaboración con la Estación Experimental de Agricultura de la Universidad de Texas, EEUU y tuvo lugar en Avignon (Francia). El artículo completo con los resultados, descritos por Chiapale (1984), se adjuntan en el Anexo 1: artículos.

Para el programa experimental se construyó un invernadero de 1000 m<sup>2</sup> de superficie a escala real, y se emplearon dos compartimentos, cada uno de ellos con una superficie de 200 m<sup>2</sup>. En el primer compartimento, el cerramiento está formado por un acristalamiento sencillo y es climatizado mediante un sistema convencional a base unidades de impulsión de aire caliente situadas sobre la plantación, reforzado con un sistema de ventilación cruzada y forzada. En el segundo compartimento, el cerramiento acristalado está formado por un vidrio de control solar en la cara interior y un vidrio claro en la cara exterior. La climatización y el control de la temperatura interior se realizan a través del propio cerramiento acristalado que incorporaba una cámara de agua en circulación que disipaba el calor del vidrio acumulado por absorción de la radiación infrarroja.

En el interior de la cámara entre las dos capas de vidrio circula o deja de circular un caudal de agua desmineralizada, según la exigencia de cada situación, controlada por un termostato que detecta si el valor de la temperatura interior se encuentra por encima de un máximo o por debajo de un mínimo valor de temperatura establecido.

En el segundo compartimento, cuando el agua deja de circular por el interior del acristalamiento, se almacena en un tanque de 5000 l. de capacidad y cuando el termostato lo detecta, se bombea de nuevo con un caudal de 225 l/min. De vuelta a la cámara interior del cerramiento, el agua atraviesa un dispositivo

---

<sup>68</sup> (Chiapale, Van Bavel, & Sadler, 1983)(Van Bavel et al., 1981)

intercambiador de capacidad 12 kW/°C que intercambia calor con agua subterránea bombeada desde pozos que conectan con un acuífero de poca profundidad.

Los datos obtenidos tanto por los modelos reales como por las simulaciones realizadas sugieren que, a pesar de ser esencialmente iguales los niveles de temperatura del aire interior de los dos invernaderos, las condiciones para el crecimiento vegetal fueron sustancialmente diferentes.

En el invernadero con cerramiento acristalado activo con agua en circulación se observó que el nivel de CO<sub>2</sub> era algo más reducido, existía mayor humedad interior y la temperatura medida en las hojas de las plantas era más baja, en relación a lo observado en el invernadero con cerramiento acristalado tradicional.

#### **INNOVACIÓN EN VENTANAS SOLARES EN CLIMAS CON ALTA DEMANDA DE REFRIGERACIÓN**

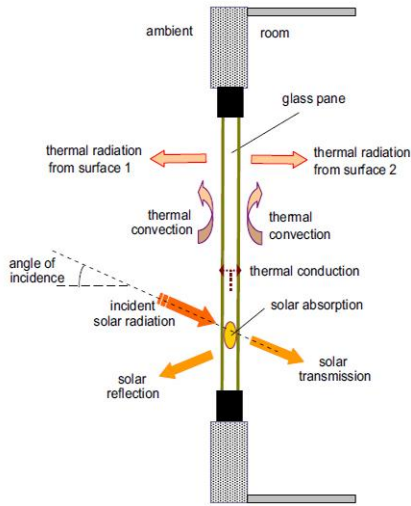
En 2009 tiene lugar una investigación realizada por la Unidad de Investigación en Energía aplicada a la Edificación y el Medioambiente de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Hong Kong, sobre acristalamientos avanzados de aplicación en climas de alta demanda de refrigeración (Tin-tai Chow, 2009)<sup>69</sup>. Este artículo es de un interés central en este trabajo de investigación, describiendo el artículo a continuación, adjuntándolo por completo en el Anexo – Artículos de relevancia.

El estudio analiza y compara el rendimiento energético de los diferentes tipos de vidrios, (vidrio sencillo, doble vidrio con y sin circulación de aire (doble piel de vidrio) y vidrios con agua en circulación) en base a los dos principios generales del diseño sostenible de acristalamientos en lugares con demanda de refrigeración. El punto de base de este estudio nos parece muy interesante, al ser uno de los primeros artículos encontrados, que buscan la reducción del espectro infrarrojo, y no en controlar la entrada de luz visible.

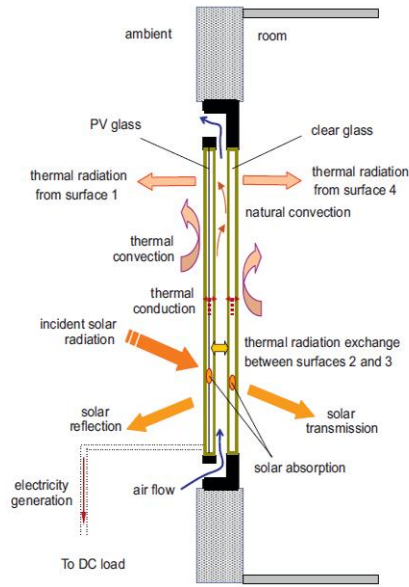
Por otro lado, se presenta el concepto innovador de los acristalamiento con fluidos en la cámara y su gestión energética, y se discuten cuáles son sus áreas potenciales de aplicación. Es el único artículo encontrado que analiza las ventajas e inconvenientes de los vidrios dinámicos, finalizando con la descripción de las virtudes y defectos de los vidrios con agua, sin existir hasta el momento un artículo publicado acerca de éstos. Los resultados indican que este diseño de acristalamiento es capaz de dar apoyo al sistema de suministro de agua caliente, reducir las cargas de refrigeración en edificios con grandes superficies acristaladas, y mejorar el confort térmico y visual interior.

---

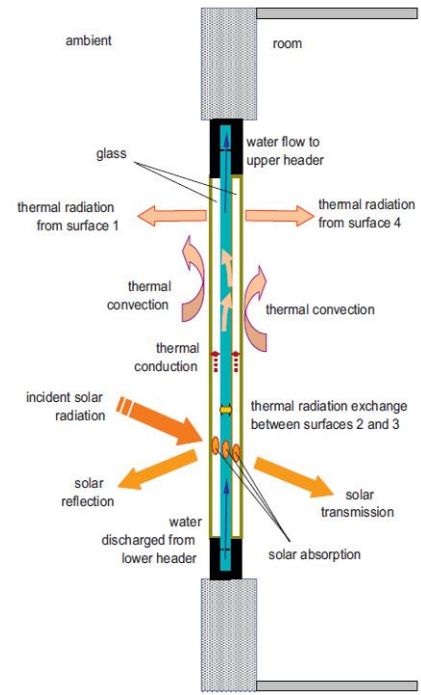
<sup>69</sup> (Chow et al., 2010)



**Fig. 1.** Energy flow paths at single-pane glazing.



**Fig. 2.** Energy flow paths at natural-ventilated PV double-pane window.



**Fig. 3.** Energy flow paths at water-flow double-pane window.

Fig. 2-65. Comparación y caracterización de los tres sistemas de vidrios utilizados, el último con agua. Fuente: Tin-tai Chow (2009).

Tin-tai Chow (2009) consigue comparar y caracterizar la configuración física y el análisis de flujo de tres sistemas de vidrio. El primero (fig 1) formado por dos vidrios con cámara de aire sellada. El segundo sistema analizado formado por dos paneles acristalados, cada uno de ellos con dos vidrios con cámara de aire sellada y entre los dos paneles se genera una cámara ventilada naturalmente por flujo de aire. El tercero (fig 3), y el que nos interesa, muestra la configuración de un acristalamiento formado por dos vidrios con una cámara interior de 10 mm que incorpora un caudal de agua que forma que parte de un circuito. Para este último (Tabla 8) se estudian tres configuraciones diferentes de lunas de vidrio, que han sido seleccionados por ser un coste de producción relativamente bajo: vidrio claro-agua-vidrio claro; vidrio claro – agua – vidrio reflectante; vidrio coloreado – agua – vidrio claro.

Para cada una de las tres configuraciones anteriores, se estudian dos casos en función de la velocidad de circulación del agua, con un caudal de agua de 0.005 m/s (flujo forzado) y con un caudal de agua de 0.001 m/s (flujo natural).

En la tabla adjunta se muestran los siguientes resultados numéricos: transmisión luminosa (VT), aumento de temperatura del agua (Water temp rise), temperatura de cada panel de vidrio exterior e interior (Glass temp), valores máximos de cantidad de calor registrados en el agua (Heat pick by water stream), y ganancia de calor interior (Room heat gain).

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

Tabla 2-XIV. Tabla comparativa de los distintos tipos de vidrios estudiados. Fuente: T. T. Chow (2009).

Comparativamente, los casos tipo vidrio claro – agua – vidrio claro (W1, W4) son menos atractivos en cuanto al nivel de ganancia de calor interior y de ganancia de calor del agua, y en cuanto a que debido a la similitud de Vt con el de aire, puede llegar a producir deslumbramiento. Sin embargo, el nivel de transmisión luminosa es alto, lo que implica un mayor aprovechamiento de la luz solar.

El efecto es diferente en los casos vidrio claro – agua – vidrio reflectante (W2, W5), que presentan una mayor reducción de ganancia de calor interior y un nivel moderado de ganancia de calor del agua. La desventaja es que el nivel de transmisión de luz es más bajo, lo que implica un mayor consumo de luz artificial.

Finalmente los casos tipo vidrio coloreado – agua – vidrio claro (W3, W6) muestran un valor alto de ganancia de calor del agua, un nivel atractivo de reducción de ganancia de calor interior, y un nivel moderado de transmisión luminosa. Esta última configuración de vidrio es la configuración óptima, en términos de ahorro en consumo de aire acondicionado, iluminación, y agua caliente.

Si se compara un mismo vidrio con flujo de agua en régimen turbulento o forzado (0.005m/s) y natural (laminar) (0.001 m/s), se observa cómo se obtienen hasta un 22% de ahorro con un flujo de agua forzado en vidrio tintado (W3 y W6). La diferencia de ahorro en los otros vidrios son menores (1.56% y 9% en vidrio claro y vidrio reflectante respectivamente).

El estudio concluye que los resultados numéricos el vidrio con cámara de agua en circulación puede efectivamente reducir la temperatura interior del vidrio, la ganancia de calor solar y por lo tanto el consumo eléctrico del recinto. El flujo de agua en un vidrio puede funcionar como componente de agua precalentada y servir a otros usos. De acuerdo a los resultados numéricos expuestos se concluye que el ahorro energético varía en función del caudal del agua, siendo mayores en circulación forzada que en aquella laminar, manteniéndonos siempre en régimen laminar. La diferencia de temperatura del agua es importante para conseguir mejores ahorros energéticos. Por lo que se propone un estudio de ensayos a nivel de la temperatura del agua.

La obtención de los datos y valores expuestos en el artículo se ha realizado a través de simulaciones informáticas. Se destaca por tanto que no se han realizado ensayos físicos, por lo que sería de gran interés la justificación de dichos resultados mediante tests reales. Tras observar las referencias, no se ha encontrado ninguna

referencia con respecto a los vidrios con agua, por lo que éstos serían los primeros datos publicados con respecto a estos tipos de vidrio, tras la experiencia de Intelliglass, como empresa comercial.

Este artículo, recientemente publicado (7 de septiembre de 2009), es de dos años de diferencia con respecto al inicio de la presente investigación (Junio de 2006), y 6 meses de diferencia con respecto al artículo publicado por la autora de la presente investigación en la revista DYNA [Giménez, MC(2009)]<sup>70</sup>.

Los artículos más relevantes descritos en el presente capítulo se adjuntan en el Anexo 1: artículos.

## 2.5. CONCLUSIONES PARCIALES

Las conclusiones parciales que podemos extraer de este capítulo son:

- Con respecto a los vidrios dinámicos disponibles y a su posible aportación a la mejora de la eficiencia energética en los acristalamientos podemos seleccionar:
  - Los vidrios cromogénicos.
  - Los vidrios con cámara de agua
- Los vidrios cromogénicos pueden aportar mejoras en el aspecto térmico y lumínico. De ellos, y tras el estudio realizado, los vidrios electrocrómicos es la tecnología más madura con productos comerciales disponibles capaz de funcionar al exterior y con menos problemas que el resto, así como, el único capaz de reducir la entrada de radiación infrarroja de onda larga, culpable del calentamiento del ambiente interior. Por un lado, en el aspecto lumínico, reducen el deslumbramiento y se puede controlar la entrada de luz visible en caso de radiación directa, eliminando parcialmente el uso de protecciones solares o persianas, pudiendo ser controladas por el propio usuario, en el caso de los vidrios dinámicos activos. Por otro lado, sus altos costes de comercialización, su difícil adaptación al usuario, tal y como menciona M. Zinzi(2005)<sup>71</sup>, y los largos tiempos tiempo coloración (a veces minutos) y defectos tal y como se ha visto en el punto 2.2, hacen difícil su apertura en el mercado. Por otro lado, en el aspecto térmico, como se ha observado anteriormente, no está lo suficientemente desarrollado e investigado. Estos vidrios bloquean el paso de la radiación infrarroja de onda larga, por lo que reducen la temperatura alcanzada en el interior de la vivienda, y por ende los gastos energéticos de aire acondicionado. Al poder ser regulados, permitiría en invierno, el tener una alta captación, y por tanto una reducción de la carga energética de calefacción.
- Una opción de desarrollo en el campo de vidrios inteligentes, y con un gran futuro, sería el uso de los vidrios fluidos circulantes en el interior de su cámara. Estos vidrios, son capaces, según los estudios indicados [(Tin Tai

---

<sup>70</sup> (Gimenez Molina, 2009)

<sup>71</sup> (M. Zinzi, 2006)

Chow (2009)], de reducir la temperatura interior del vidrio, la ganancia de calor solar y por lo tanto el consumo eléctrico.

- El estudio de las circulaciones de aire en una fachada de doble piel puede ayudar a un buen entendimiento del comportamiento de los vidrios con cámara de agua. Por otro lado, las reducciones obtenidas gracias a las ventajas de una doble piel de vidrio, podría mejorarse y optimizarse gracias al uso de vidrios especiales, como pueden ser los vidrios electrocrómicos.
- Con respecto al estado del conocimiento sobre las prestaciones energéticas de los vidrios dinámicos propuestos:
  - Las prestaciones teóricas de los vidrios electrocrómicos no alcanzan según diversos estudios las prestaciones energéticas deseadas, ya que no pueden proveer un control completo de los indeseados efectos de la radiación solar directa, provocando deslumbramiento. Entre otros motivos que obstaculiza su comercialización son el largo tiempo de encendido a bajas temperaturas y un color final no uniforme.
  - Los resultados numéricos indican que el agua puede efectivamente bajar o aumentar la temperatura del panel de vidrio interior, reducir la carga térmica del recinto por tanto los consumos eléctricos. El confort visual y térmico pueden ser mayores que con el resto.
- Se han empleado diversos métodos en base a células de ensayo para medir las prestaciones leídas en la literatura científica para los vidrios electrocrómicos, que confirman las teóricas. Sin embargo las prestaciones estimadas teóricamente para los vidrios con cámara de agua, aún no han sido medias experimentalmente, mediante algún método de ensayo, por lo que falta aún su confirmación.

## INDICE CAPÍTULO 3. OBJETIVOS

<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>109</b>
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	109
3.2. JUSTIFICACIÓN .....	110
3.3. OBJETIVOS CONCRETOS O PARTICULARES.....	111
3.4. HIPÓTESIS DE PARTIDA .....	114





### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general y principal de la presente investigación es demostrar experimentalmente que se pueden conseguir mejoras en la eficiencia energética de edificios mediante el uso de vidrios dinámicos, en especial en los vidrios con cámara de agua en circulación.

Desde el punto de vista del estado de la técnica, la principal mejora desde los años 70 en el comportamiento energético de los acristalamientos se debe a la incorporación de vidrios con capas metálicas, es decir, bajo emisivos y de control solar. Sin embargo, su empleo no soluciona por completo las deficiencias inherentes a los acristalamientos en el aspecto térmico. Últimamente se han incorporado vidrios con cámara de vacío o de aerogel en gránulos pero que solucionan de modo parcial el problema energético del acristalamiento.

De manera limitada recientemente se ha comenzado a investigar acerca de la utilización de los denominados vidrios dinámicos o cambiantes, tales como electrocromicos, cristal líquido etc. que aunque con una comercialización aún muy baja, su utilización está demostrando aportaciones sensibles de índole energética, que hacen que merezca la pena su investigación, y muy especialmente la de los vidrios con agua circulante por la cámara, que parecen ser la alternativa más prometedora según la literatura científica consultada.

Debido a que la transparencia de la envolvente arquitectónica sigue considerándose un valor fundamental por permitir las vistas, la fluidez del espacio y la sensación de amplitud, se convierte en un aspecto de interés fundamental la mejora del comportamiento energético sin penalizar la transparencia, es decir, en la búsqueda de un acristalamiento capaz de dar las prestaciones energéticas requeridas con un bajo consumo energético pero sin merma de la transparencia, en cualquier momento del día.

La prueba fehaciente de la aspiración arquitectónica de conseguir una casa de vidrio eficiente lo podemos encontrar entre otros en el anteproyecto de casa solar presentado por la UPM al concurso Solar Decathlon 2007. La constatación de que a pesar de su interés, sus prestaciones energéticas no podían estar a la altura de la competición, entre otras razones, fue determinante para su abandono en favor de cerramientos más convencionales con grandes zonas opacas bien aisladas.

Desde el punto de vista del estado de la investigación desarrollado se ha constatado lo siguiente:

- Falta de un conocimiento profundo del comportamiento energético de los acristalamientos en condiciones reales de intemperie. Los ensayos de laboratorio realizados ignoran la incidencia cambiante de los rayos solares y la emisividad del cielo.
- Falta de conocimiento científico sobre las prestaciones energéticas a nivel térmico de los vidrios cromogénicos y de desarrollo de investigaciones de

vidrios con fluido circulante en la cámara, ambas muy especialmente en condiciones reales de servicio.

- Indicios teóricos de que el mejor comportamiento energético lo podría proporcionar eventualmente el vidrio con cámara de agua circulante (Tin Tai Chow (2009)).

### 3.2. JUSTIFICACIÓN

La mejora de la eficiencia energética de los cerramientos arquitectónicos en general y de los acristalamientos en particular es un objetivo clave en la consecución de una construcción sostenible, como se viene indicando últimamente desde distintos foros gubernamentales y científicos.

Cabe citar las ayudas estatales para la sustitución de ventanas por otras más eficientes, como el *plan renove*<sup>72</sup>, o la preocupación y focalización de intereses por parte del DOE y del NREL con respecto al estudio de vidrios dinámicos en este sentido<sup>73</sup>.

La mejora de la eficiencia energética de los edificios puede enfocarse, y a veces se ha recomendado, bajo la perspectiva de la reducción de las superficies acristaladas y por ello, de su impacto negativo en las prestaciones generales de la envolvente. Es un hecho constatable, sin embargo, que la arquitectura residencial más influyente, es decir, proyectada por autores reconocidos como Toyo Ito, seleccionado entre otros para el premio Pritzker 2010, sigue utilizando grandes superficies acristaladas reivindicando la transparencia como un valor arquitectónico de primer orden. Ello justifica la actual investigación en la mejora del comportamiento energético de cerramientos transparentes, ya que su uso aún lejos de minimizarse, constituye una tendencia arquitectónica prioritaria.

La justificación del objetivo de esta tesis desde el punto de vista de su oportunidad en el tiempo y en el espacio, es decir de su originalidad y de su viabilidad en el Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la UPM, está en las siguientes razones:

- Es novedosa: puesto que en el estado de la técnica no se ha estudiado lo suficiente y se han encontrado tanto déficits como lagunas en el estudio de la eficiencia energética de vidrios dinámicos.
- Es interesante: puesto que se trata de la mejora de la eficiencia energética en los cerramientos o sistemas acristalados cuyas prestaciones no son aun satisfactorias. Se trata de la mejora de la eficiencia energética en la edificación, sin renunciar a la transparencia como valor fundamental arquitectónico.
- Es viable: esta investigación es viable y ha sido factible con los medios disponibles en la ETSAM, entre otros mediante el uso de simulaciones informáticas y ensayos físicos.

---

<sup>72</sup> Plan renove de ventanas. Comunidad de Madrid. <http://www.cambialasventanas.com/>

<sup>73</sup> Architectural Record. 12.07. Pg. 151-152.

### 3.3. OBJETIVOS CONCRETOS O PARTICULARES

Una de las dificultades fundamentales en el desarrollo de esta investigación es precisamente la medición y cuantificación de la eficiencia energética de los cerramientos en los edificios. La complejidad del fenómeno de los intercambios térmicos desde el punto de vista pasivo, es decir sin la alteración de sus condiciones de exposición a la intemperie, es muy importante y aún no está resuelto y lo es aún más si se le añaden las operaciones de ventilación o apantallamiento solar variable (persianas), donde el problema se complica considerablemente.

Por tanto no solo es interesante el objetivo general del estudio de la eficiencia energética en los acristalamientos sino también la puesta a punto de métodos de estudio prácticos y eficaces para determinar las prestaciones energéticas de diferentes tipos de vidrio.

Actualmente existen dos procedimientos de estudio de la eficiencia energética de los cerramientos acristalados. :

- Desde el punto de vista teórico destacamos el cálculo a partir de parámetros como el factor solar ( $g$ ) o la transmitancia térmica ( $U$ ), ampliamente conocidos y descritos en la normativa (Código Técnico de la Edificación, en adelante CTE). Su vertiente más reciente es la simulación informática mediante programas como Ecotect, DesignBuilder, entre otros. Su fiabilidad está aún en fase de mejora.
- Desde el punto de vista práctico o empírico, se han realizado y están descritos en la literatura científica varios métodos experimentales entre los que destacan las fotografías de infrarrojos "termografías" y los ensayos en cámaras cerradas con medición de temperatura y humedad frente a diferentes condiciones exteriores. De ellos cabe distinguir dos tipos: los realizados bajo condiciones controladas de laboratorio y los realizados en condiciones exteriores de intemperie real.

Por todo ello un objetivo complementario de esta tesis es definir una metodología de investigación adecuada que permita alcanzar el objetivo propuesto. Se proponen por tanto como objetivos particulares aquellos que derivan de las dificultades metodológicas disponibles actualmente, resumidas en el siguiente cuadro.



Fig. 3-1. Esquema de trabajo para el seguimiento de los objetivos.

Pasemos a enumerar los objetivos particulares de la presente investigación en función de las distintas metodologías utilizadas:

Objetivos de la Metodología Documental:

En este grupo cabe destacar el objetivo de seleccionar mediante el análisis crítico de la literatura científica, del conocimiento técnico disponible, y de experiencias adquiridas, como es la participación en el concurso Solar Decathlon 2007 (SD7), de los diferentes tipos de vidrios dinámicos y de aquellos sistemas constructivos que de algún modo pueden realmente aportar mejoras a la eficiencia energética de los acristalamientos.

Por otra parte se acude al conocimiento científico publicado para proponer un nuevo método experimental adecuado, aprovechando las aportaciones de experiencias previas.

Igualmente se acude a las fuentes más fiables posibles para la selección y utilización del programa de simulación más acorde con la índole de la investigación propuesta.

Podríamos resumir y enumerar los siguientes objetivos:

- Selección razonada de aquellos vidrios y sistemas de acristalamiento que pueden aportar mejoras energéticas.
- Influencia de los acristalamientos en viviendas energéticamente eficientes en función de la superficie acristalada y el tipo de vidrio, analizando los datos obtenidos de la monitorización de las viviendas en SD7.
- Conocimiento utilización y elección de programas de simulación energética con el fin de elegir el software acorde con la índole de la presente investigación.

- Conocimiento y realización de ensayos físicos publicados en revistas con el fin de proponer ensayos adaptados a esta investigación.

#### Objetivos de la metodología de simulación

Debido a que el trabajo con programas de simulación reviste una complejidad importante, que va desde la construcción de modelos hasta la interpretación y ajuste de los resultados, pasando por la aplicación de hipótesis y caracterización de materiales, uno de los objetivos fundamentales de la simulación es la definición de un modelo sencillo que permita la detección de errores con la mayor rapidez y la comprobación de la fiabilidad de los resultados obtenidos de manera sencilla. Esto obliga a estudiar un método coordinado entre simulación y ensayos que permita aprovechar y contrastar la información obtenida en ambos procesos de la manera más sencilla y transparente posible.

De manera inesperada se ha convertido en objetivo de la simulación la selección de un nuevo programa de simulación energética, ante el fracaso obtenido con el software utilizado, que previamente había sido elegido a partir de la metodología documental, a la vista de la falta de precisión de los resultados obtenidos por los programas de simulación que gozan de prestigio en las fuentes consultadas<sup>74</sup>.

Resumiendo se podrían enumerar los siguientes objetivos:

- Selección del programa de simulación adecuado.
- Aportaciones de las experiencias previas con programas de simulación.
- Simulación de las condiciones de ensayo con el fin de poder contrastar las simulaciones con los ensayos experimentales.
- Comprobación de la precisión de los resultados de la simulación.

#### Objetivos de la metodología experimental:

Debido a que una parte importante de la investigación propuesta de esta tesis es de índole experimental y debido también a que en la literatura científica no existe unanimidad en la manera de estudiar la eficiencia energética de los acristalamientos, uno de los objetivos particulares de la tesis es precisamente la definición de un método de ensayo que aproveche las aportaciones de experiencias previas en dos direcciones:

- Fiabilidad y aplicación real de los resultados. Para ello se han seleccionado los ejemplos de ensayos que trabajan con condiciones reales de intemperie por ser las más cercanas a las condiciones de trabajo de un acristalamiento en la arquitectura y a priori las que deben dar resultados más realistas, es decir, más fiables y precisos.
- Economía y sencillez de ejecución. Cuanto más sencillo es el ensayo más generalizables son sus resultados, ya que como se ha dicho, la singularidad de los edificios hace que las mediciones que se realicen en un caso no sean extrapolables a otros, por motivos tan diversos como la situación,

---

<sup>74</sup> Al no existir fuentes científicas se ha acudido a las más fiables dentro de las disponibles. (DOE).

orientación entorno costumbres de sus ocupantes etc. Por otra parte el contraste con los resultados de la simulación, objetivo particular clave de esta tesis, obliga a perseguir el objetivo de la sencillez. Sobre la economía, significa a menudo la diferencia entre el ser y el no ser, es decir entre poder ejecutar un plan experimental o no tener que abortarlo por falta de medios económicos. Se entiende que este objetivo particular de la economía no puede ir en menoscabo de la fiabilidad de los resultados por lo que se ha puesto especial cuidado en este punto.

Podemos enumerar por tanto los siguientes objetivos pormenorizados:

- Realización y caracterización de un nuevo método de ensayo para la evaluación de las ganancias y pérdidas térmicas que proporcionan diferentes elementos ligeros de cerramiento, entre ellos el vidrio. Éstas servirán para medir las ganancias térmicas y las pérdidas de cualquier acristalamiento.
- Comparación de las prestaciones de vidrios dinámicos con vidrios convencionales.
- Estudio del comportamiento de los vidrios en los distintos escenarios en condiciones reales: solsticios de verano e invierno.
- Estudio de los efectos fundamentales: captaciones diurnas y pérdidas nocturnas.
- Diseño, estudio, descripción y caracterización de vidrios con cámara de agua.
- Experimentación de la eficiencia energética de vidrios con cámara de agua mediante ensayos.

### 3.4. HIPÓTESIS DE PARTIDA

La hipótesis de partida de la presente investigación se podría enunciar del siguiente modo:

Es posible conseguir mejoras adicionales en las prestaciones energéticas de los acristalamientos, mediante el uso de vidrios dinámicos.

Las hipótesis de los objetivos particulares son:

- Hipótesis documentales:
  - Mediante el estudio documental, tanto de los vidrios comunes como aquellos dinámicos, existen vidrios capaces de conseguir mejoras con respecto a la eficiencia energética, principalmente con los vidrios con cámara de agua en circulación, con respecto a los vidrios comunes.
- Hipótesis de simulación:
  - Es posible conseguir una precisión de resultados entre los ensayos físicos y programas de simulación energética.

- Los programas de simulación energética permiten la reproducción exacta del ensayo así como de las condiciones climáticas exteriores.
- Hipótesis experimentales
  - Se prevé la realización de un nuevo método de ensayo, capaz de trabajar en condiciones reales de intemperie y que permita comparar diferentes vidrios con un patrón o entre sí.
  - Los vidrios dinámicos, en especial los vidrios con agua en circulación, mejoran en gran medida a los vidrios estáticos, tanto en pérdida como en ganancias.





INDICE    CAPÍTULO    4.    PLANTEAMIENTO    DEL  
PROBLEMA

<b>4.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>119</b>
4.1. SELECCIÓN DE VIDRIOS.....	119
4.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ENERGÉTICO .....	121
4.3. PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y DE SIMULACIÓN .....	123
4.4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL VIDRIO CON CÁMARA DE AGUA. ....	124



## 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con carácter previo a la propuesta de un ciclo de simulaciones y de un plan de ensayos es preciso concretar algunos aspectos fundamentales en esta investigación, con objeto de optimizar esfuerzos y medios disponibles, así como de obtener el máximo de información significativa en el tema de estudio.

En consecuencia, el primer asunto relevante a aclarar es qué tipos de vidrios se deben estudiar, considerando a priori cuáles son sus prestaciones energéticas conocidas y documentadas. De aquí surgirá la selección de tipos que realmente pueden ofrecer mejoras con respecto a la eficiencia energética de los acristalamientos, descontando el resto de vidrios dinámicos.

El segundo asunto relevante es cómo se estima la mejora de prestaciones energéticas. La primera respuesta es que por comparación con los mejores vidrios estáticos disponibles, a saber de control solar y bajo-emisivos. Eventualmente puede ser necesario hacer una medición más precisa de las prestaciones de estos últimos, en ausencia de datos aceptables. Esta medición podría siempre hacerse con respecto a un patrón sencillo como un vidrio transparente de 6mm o un vidrio doble 6+12+6 con cámara de aire.

Por otra parte surge el interrogante de qué magnitudes hay que medir y porqué son relevantes. Para ello se hará una breve reseña del comportamiento teórico conocido de los tipos de vidrio a estudiar. Los escenarios a analizar ya son conocidos y se basan esencialmente en las ganancias solares excesivas con tiempo cálido y las pérdidas térmicas con tiempo frío. Las situaciones climáticas térmicas en una ciudad como Madrid son las del solsticio de invierno, del solsticio de verano y de los equinoccios, aunque nos centraremos para su análisis en los más desfavorables, los solsticios, dejando los equinoccios, menos desfavorables, para la realización del resto de trabajo de la tesis.

Por último el tercer asunto relevante es como medir estas prestaciones. Dentro de los métodos disponibles está el de la simulación informática y de los ensayos físicos. Con objeto de aprovechar y optimizar los resultados obtenidos de ambos sería conveniente coordinar de alguna manera ambos procesos. Una manera para conseguir esta coordinación es establecer el diseño de la cámara de ensayo como modelo tridimensional en el que se realicen las simulaciones. De este modo sería factible comparar los resultados experimentales con los de la simulación y viceversa.

### 4.1. SELECCIÓN DE VIDRIOS

Como se ha comentado anteriormente en el capítulo I, de cara a la selección de aquellos vidrios candidatos de obtener mejoras en la eficiencia energética, se exponen las curvas de transmisión energética en función de las distintas longitudes de onda, para ver que vidrios son capaces de bloquear la radiación infrarroja. La línea azul que se observa marca el comienzo de los infrarrojos quedando a su derecha el paso de la radiación visible.

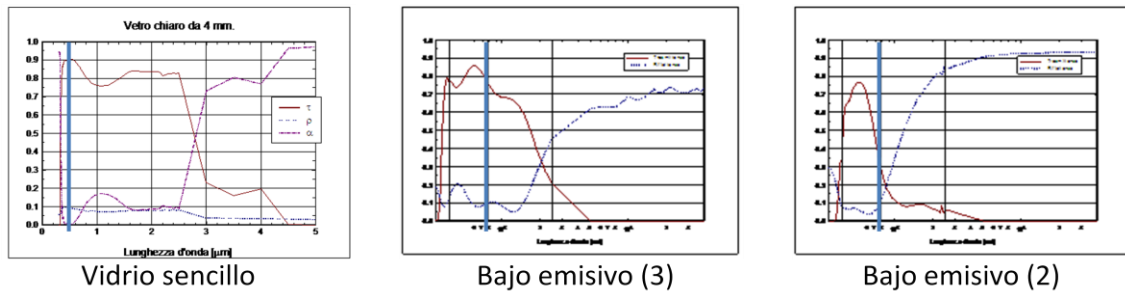


Fig. 4-1. Curvas de transmisión energética de vidrios convencionales. Fuente: tesis Michele Zinzi.

Como observamos en las curvas de transmisión energética, expuestas de forma individual y por separado en el Estado de la Técnica, se observa cómo ningún vidrio convencional es capaz de bloquear parte de la radiación infrarroja.

A continuación se exponen las curvas de los vidrios cromogénicos.

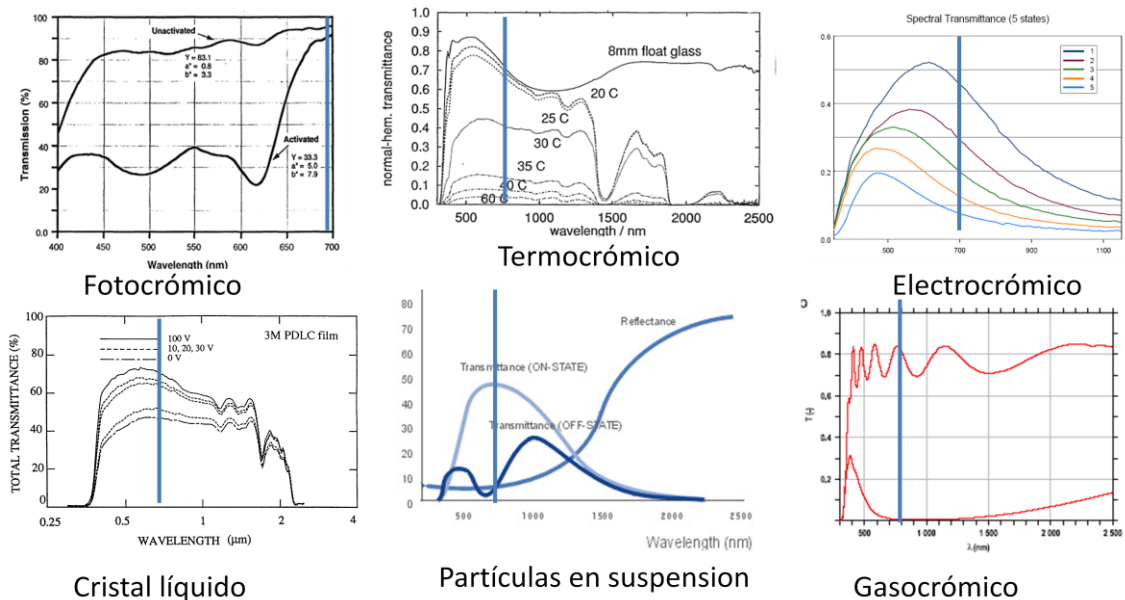


Fig. 4-2. Curvas de transmisión energética de vidrios cromogénicos. Fuente: varios archivos.

Se puede observar que los únicos capaces de absorber parte de la radiación infrarroja son los vidrios electrocrómicos.

En resumen de lo expuesto hasta ahora podemos decir que de todos los vidrios vistos a parte de los convencionales de control solar y bajo-emisivos, los candidatos o los más prometedores a aportar mejora son:

- Electrocrómico, según la documentación analizada son capaces de reducir la transmisión de radiación infrarroja. Si bien hay que citarlo como candidato posible, también es cierto que sus prestaciones máximas pueden ser alcanzadas sin dificultad por un vidrio de control solar de gama media-baja. Es decir, se pueden obtener sin dificultad, siendo la única aportación del vidrio electrocrómico su posibilidad de encendido-apagado y su graduación en 5 estados, equivalente a una persiana, bien por parte del usuario o

automáticamente. De este modo su interés para la presente investigación es menor, lo que unido a su elevado precio, estado semi-experimental y dificultad para conseguir muestras experimentales hace que finalmente sea descartado de las simulaciones y del plan experimental de esta tesis.

- El vidrio con fluido circulante en su cámara, según las características técnicas parece que podría aportar, mejoras tanto en ganancias como en pérdidas. Podría acercarse mucho por tanto al acristalamiento ideal. Es el que se propone por tanto para su estudio para la metodología experimental.

#### 4.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ENERGÉTICO

Como se ha explicado en el punto 1.2.2, a la hora de analizar y definir un vidrio, nos enfrentamos sobre todo al problema de caracterización de los vidrios en sus dos puntos más característicos: ganancias y pérdidas.

Como se ha dicho anteriormente, los rangos del espectro solar desde el ultravioleta (de 0.3 a 2.5  $\mu\text{m}$ ) hasta el rango de los infrarrojos (2.5-50 $\mu\text{m}$ ) son muy amplios. La luz visible, en el rango de 0.4 a 0.7 $\mu\text{m}$ , lleva consigo un 50% de la energía solar incidente. La radiación ultravioleta lleva un mínimo porcentaje, y el infrarrojo cercano hasta casi un 50%, tal y como indica Tin-tai Chow (2009). Como se ha comentado en el punto 1.2.4, la irradiancia solar G (incluyendo la componente directa del sol y la difusa procedente del cielo, nubes y objetos de alrededor) incidente en el vidrio es parcialmente transmitida y reflejada. La parte restante es absorbida por las capas añadidas o ingredientes del vidrio. La parte absorbida es transmitida hacia el interior como hacia el exterior, por los procesos de conducción, convección y radiación de onda larga. La capacidad para emitir el calor radiante es un factor importante a la hora del intercambio de calor en una superficie acristalada.

Para un vidrio dado, la energía total transmitida se cuantifica a partir del SHGC o factor solar, el cual es la suma de la radiación solar transmitida (G), más la convección térmica hacia el interior y la transferencia del calor de radiación.

La transferencia de calor total a través del vidrio viene dada por la suma de la transmisión solar (SHGC) y la transferencia de calor por convección (U factor).

$$Q=U(T_e-T_i)+SHGCxG$$

Como ejemplo pondremos que un vidrio claro transmite alrededor de un 77% de la radiación solar incidente (transmitancia solar=0.77)<sup>75</sup> y un 89% de la luz visible (Transmitancia visible=0.884)<sup>76</sup>. La transmitancia de la radiación infrarroja cercana puede ser útil en edificios demandantes de calor, en climas fríos, pero no en aquellos con demandas de frío en climas cálidos, como España. Las cargas energéticas de un edificio se producen principalmente por la transmisión de la radiación de onda corta incluyendo la luz visible.

En consecuencia un adecuado aprovechamiento de las ganancias térmicas del vidrio puede tener un impacto positivo en el ahorro de consumo energético por

<sup>75</sup> Datos procedentes del programa Window 5.1. LBNL.

<sup>76</sup> Ibid

calefacción. En climas cálidos, además, se necesitaría un bloqueo o reducción de esas ganancias térmicas para la reducción del consumo energético debido al aire acondicionado.

Del mismo modo, como se ha comentado anteriormente el vidrio por su alto coeficiente de transmisión, tiene la misma facilidad para captar ese calor que para perderlo, lo que provocaría la pérdida del calor o del frío almacenado. Las mayores pérdidas se suelen dar durante la noche, por lo que se deberán colocar cortinas o persianas con aislamiento térmico para evitar pérdidas excesivas.

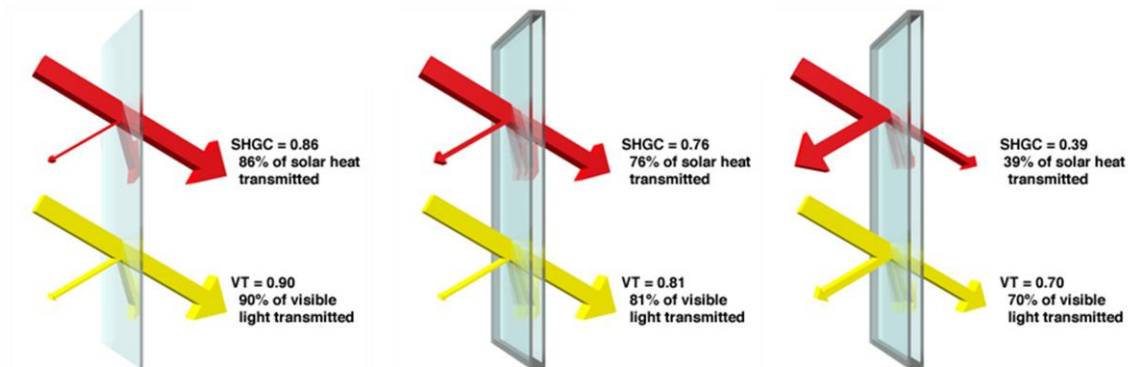


Fig. 4-3. Esquema de ganancias térmicas del vidrio.

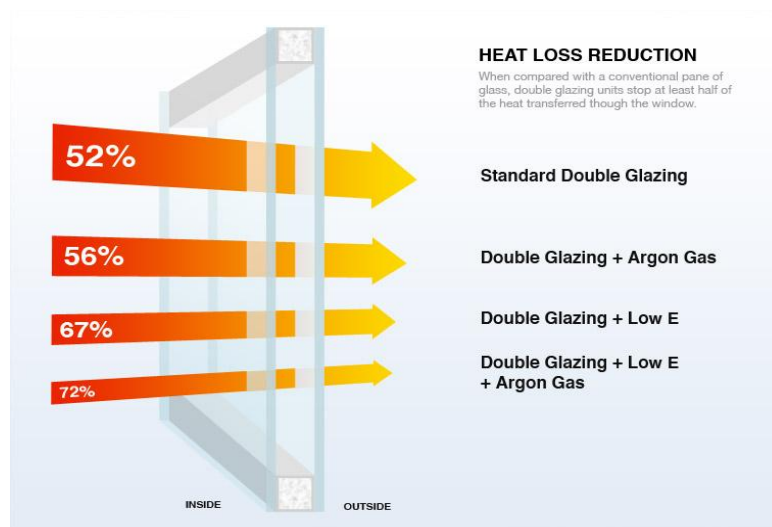


Fig. 4-4. Esquema de pérdidas térmicas del vidrio.

Resumiendo lo comentado anteriormente podríamos decir que:

- Las ganancias solares son beneficiosas en invierno para reducción de consumo.
- Ganancias excesivas en verano dan lugar a un consumo energético excesivo en aire acondicionado.
- Pérdidas excesivas en invierno dan lugar a un consumo energético elevado en calefacción.

Por lo tanto el acristalamiento ideal medio debería tener un aislamiento térmico perfecto ( $U=0$ ) y un control absoluto de las ganancias térmicas sin pérdida de la transparencia.

Por tanto desde el punto de vista energético se producen dos efectos:

- Consumos por pérdidas con tiempo frío. Las pérdidas por conducción pueden reducirse pero no eliminarse. Una posibilidad de neutralizar esas pérdidas sería mantener el acristalamiento a una temperatura adecuada, según la teoría del muro neutralizante de Le Corbusier, aunque a costa de cierta energía empleada en el proceso.
- Ahorros/consumos por ganancias térmicas: aportaciones de calor en invierno en orientaciones solares adecuadas y posibles aportaciones de calor en verano según los casos y el diseño arquitectónico. Su control puede hacerse mediante apantallamiento que suele comprometer la transparencia. Los vidrios dinámicos con fluido circulante resolverían este problema. Adicionalmente los vidrios con fluido circulante podrían actuar como captadores en invierno en apoyo de instalaciones de captación solar térmica.

#### 4.3. PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y DE SIMULACIÓN

Para el estudio tanto de la captación como de las pérdidas, se plantea una doble metodología, tal y se ha expuesto anteriormente, de simulación y experimental.

Para la metodología experimental se ha tenido en cuenta la monitorización a tiempo real de edificios ya construidos o realizados ex profeso para tal fin, de los cuales podríamos citar entre otros la residencia en Houston que fue originalmente construida como parte de un proyecto sobre el uso de la energía, patrocinado por el National Association of Home Builders Research Center y el U.S. Department of Energy en colaboración con el National Partnership for Advancing Technology in Housing y unas salas de oficinas privadas de un edificio de oficinas en Oakland, California (EEUU) en la primavera del año 2000, mediante la implantación de un control capaz de ajustar la transmisión y luminosidad interior dada por vidrios electrocrómicos para conseguir los requerimientos buscados de luminosidad, confort, refrigeración, iluminación y vista,<sup>77</sup> tal y como se ha descrito éste y otros en el capítulo I.

El problema de la monitorización de edificios reales es que tiene un presupuesto muy alto, aparte de la imposibilidad de transporte y movilidad del edificio para caracterizarlo en distintos climas. Por ello resulta interesante el trabajo con modelos de menor tamaño y presupuesto.

Nos encontramos ante otro método de estudio bastante desarrollado por investigadores. Se trata de la utilización de las denominadas células de ensayo en condiciones de interior y exterior.

---

<sup>77</sup> (Lee, E. 2000)

A partir de ahí se ha propuesto un nuevo método de ensayo que se explica en el capítulo III, metodología experimental, que consiste en una cámara capaz de medir tanto las ganancias como las pérdidas de distintos tipos de vidrios y en condiciones reales. Para ello se plantea ensayar el vidrio dinámico seleccionado (vidrio con cámara de agua), y estudiar sus prestaciones frente a vidrios convencionales, seleccionando dentro de ellos los vidrios bajo emisivos y de control solar.

Otra metodología a emplear es la de simulación energética por ordenador, mediante la ejecución de modelos sencillos y similares a los ensayos ejecutados, con el fin de comprobar la fiabilidad de estos programas de simulación.

#### 4.4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL VIDRIO CON CÁMARA DE AGUA.

Este punto plantea ahondar más detalladamente en el comportamiento del agua y del vidrio frente a la radiación infrarroja, para un estudio pormenorizado de estos tipos de vidrios.

El intercambio de radiación entre un gas y una superficie que transfiere calor, es muy compleja. A diferencia que la mayoría de los cuerpos sólidos, en muchos casos los gases son transparentes a la radiación.

Pues bien, cuando la energía radiante incide sobre la superficie de un material, parte de la radiación se refleja, parte se absorbe y parte se transmite. Se define reflectancia como la fracción reflejada, la absorptancia como la fracción absorbida y la transmitancia como la fracción transmitida. Cuando un material absorbe y emite radiación, lo hacen generalmente en determinadas bandas estrechas de longitudes de onda. Algunos gases, como el O<sub>2</sub>, son básicamente transparentes a temperaturas bajas, mientras que el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>O radian apreciablemente.

Con frecuencia los gases absorben únicamente en bandas estrechas de longitudes de onda. Por ejemplo, según indica Holman (2002)<sup>78</sup>, "el vapor de agua tiene aproximadamente una absorptancia de 0.7 entre 1.4 y 1.5  $\mu\text{m}$ , de 1.0 entre 2.6 y 2.8  $\mu\text{m}$ , de 0.8 entre 1.6 y 1.8  $\mu\text{m}$  y de 1.0 entre 5.5 y 7.0  $\mu\text{m}$ . la absorptancia varía en función del espesor de la capa de gas y de la temperatura".

##### Transmisión luminosa del agua

Una de sus características, es que al tener la capacidad de absorber la radiación infrarroja, al contrario que el vidrio, que es transparente a esas longitudes de onda, pero opacas a la radiación ultravioleta, nos proporcionaría parte del confort térmico deseado.

En la siguiente imagen, se muestra, la absorción del agua, frente a distintas longitudes de onda. El infrarrojo, corresponde a una longitud de onda, a partir de 750nm. Se observa, como a partir de esas longitudes, el agua absorbe dichas radiaciones.

---

<sup>78</sup> (Holman, 2002)



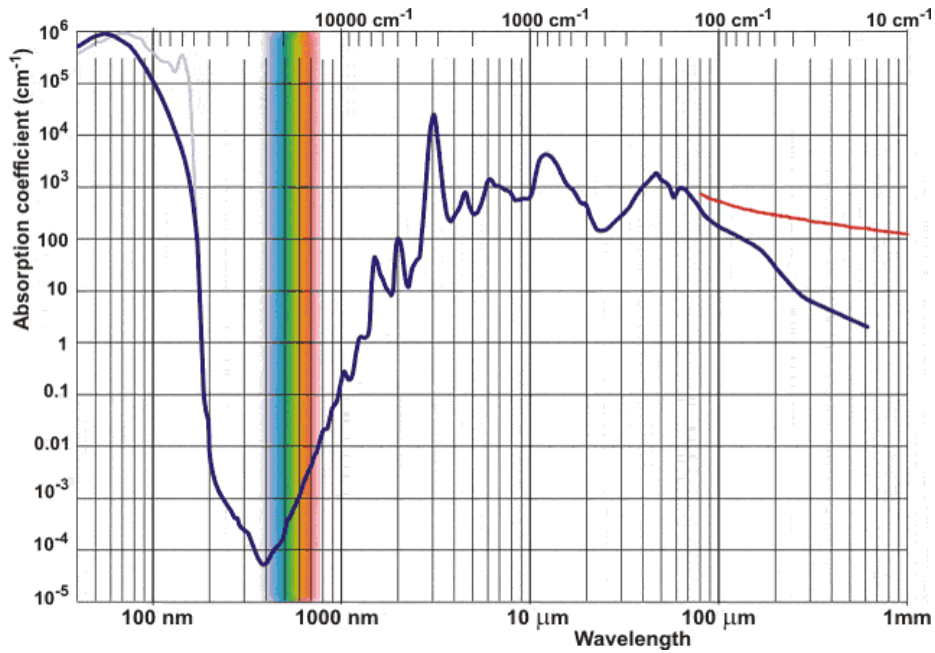


Fig. 4-5. Absorción del agua en función de las distintas longitudes de onda.  
<http://www1.lsbu.ac.uk/water/vibrat.html>

En la siguiente gráfica se muestra una Comparación de la absorción de radiación ultravioleta, visible e infrarroja por varios gases en la atmósfera. La mayoría de la luz ultravioleta (menor de  $0.3\mu$ ), es absorbida por la el ozono ( $O_3$ ) y el oxígeno ( $O_2$ ). El  $CO_2$  tiene tres largas bandas de absorción en la zona del infrarrojo sobre todo en el  $2.7$ ,  $4.3$  y  $15\mu$ . El agua tiene diversas bandas de absorción en la región del infrarrojo, e incluso alguna en la zona de las microondas.

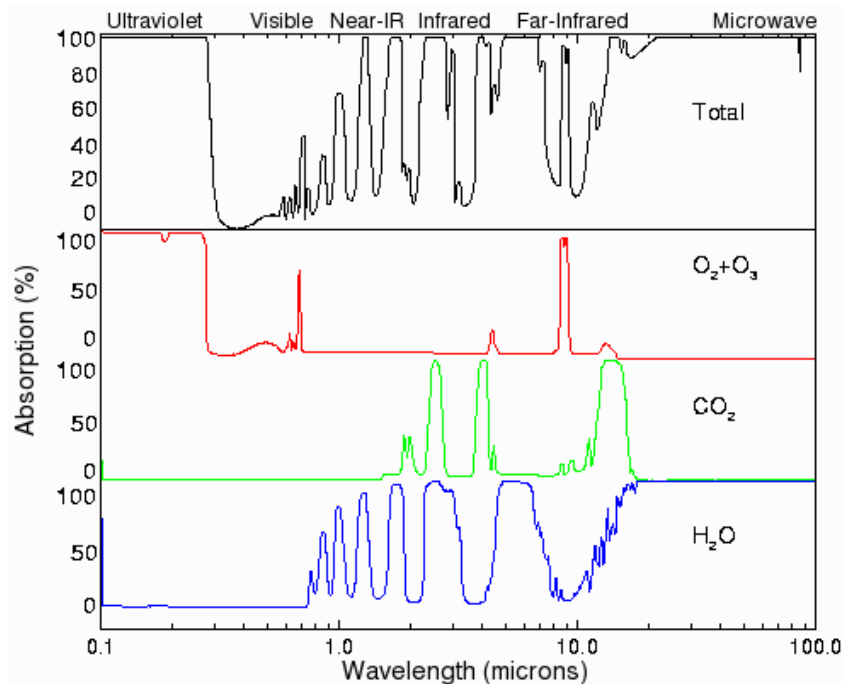


Fig. 4-6. Absorción en algunos gases de determinadas longitudes de onda. Fuente:  
<http://brneurosci.org/co2.html>

La radiación incidente sobre un vidrio es absorbida, reflejada y transmitida, y la relación de cada fracción respecto a la energía incidente define los factores energéticos de un acristalamiento en la siguiente normativa: (UNE-EN-410)

Radiación total incidente a través del vidrio:

3 % Ultravioleta:  $\lambda$  muy pequeña (0.28-0.38  $\mu\text{m}$ )

42 % Luz visible:  $\lambda$  media (0.38-0.78  $\mu\text{m}$ )

55 % Infrarrojos:  $\lambda$  grande (0.78- 2.5  $\mu\text{m}$ )

En la siguiente gráfica se muestra el % de transmisión y absorción de un doble acristalamiento 4/12/4.

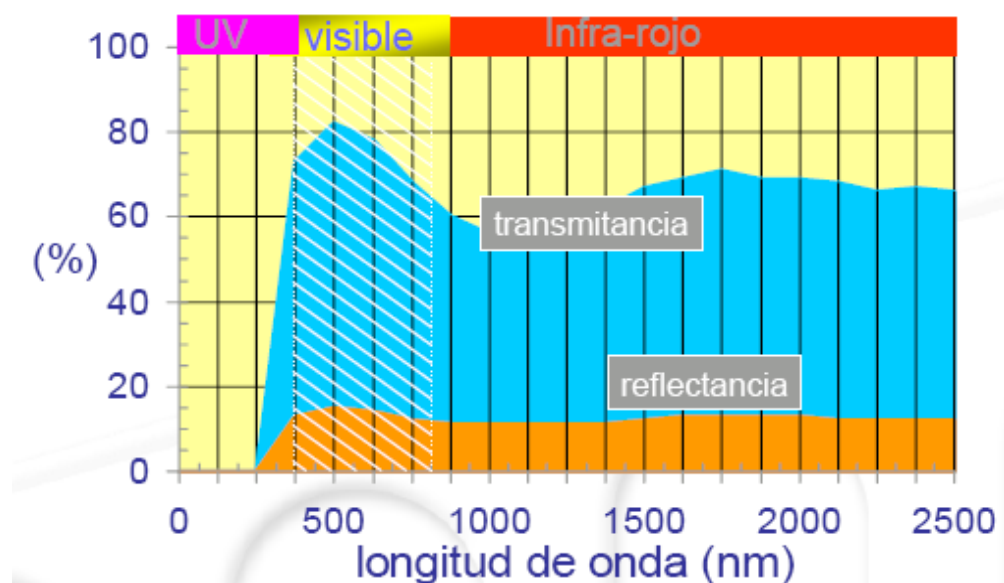


Fig. 4-7. Absorción y transmisión en un doble acristalamiento 4/12/4 de determinadas longitudes de onda. Fuente: Saint Gobain Glass.

La lámina de agua, no eliminaría totalmente el efecto invernadero. El agua bloquea el paso de los infrarrojos en mayor medida que el vidrio, pero no minimiza el efecto invernadero, que consiste, como se ha explicado anteriormente, en que la radiación infrarroja emitida por los objetos calentados en un interior no puede salir al exterior.

En un vidrio con cámara de agua lo que ocurre es que al absorber el agua más radiación infrarroja que el vidrio, disminuye la radiación total incidente (aproximadamente un 55%), que penetra al interior del espacio. Desde este punto de vista ha disminuido el efecto invernadero, pero no lo ha bloqueado totalmente.

Avanzando un poco más, si el vidrio filtra el ultravioleta y parte del infrarrojo, y el agua filtra prácticamente todo el infrarrojo, entonces podemos concluir diciendo que a través de un acristalamiento con cámara de agua solo entra, prácticamente radiación de espectro visible.

Hasta aquí se ha supuesto agua estancada. Avancemos un poco más para observar que es lo que pasa con agua en circulación. La circulación del agua<sup>79</sup>, hace que se lleve parte del calor absorbido, por lo que es fácil suponer que un caudal más alto, la temperatura interior disminuirá, debido a que se lleva más rápidamente el calor acumulado. Podríamos distinguir por tanto en régimen laminar<sup>80</sup> y régimen turbulento<sup>81</sup>. Por otro lado, al tratarse de un cerramiento transparente, se busca la transparencia como valor arquitectónico, por lo que irse a un caudal en régimen turbulento (mayor de 10 l/min aproximadamente)<sup>82</sup>, modificaría y dificultaría e impediría en parte la visión a través de él, por la aparición de burbujas o bolsas de aire. Este calor absorbido por el agua, y posteriormente eliminada esta ganancia térmica al estar el agua en circulación, podría ser aprovechado por otros sistemas de precalentamiento de agua.

La determinación del factor U y del factor g, es en cierta medida muy difícil. El agua, tiene una conductividad muy alta, por lo que un vidrio con agua estancada, podría aumentar incluso el factor U a 5,388 W/m<sup>2</sup>K y un factor solar g de 0.708, que al compararlo con un vidrio doble común 6/8/6 se obtiene un U de 2.898 y un g de 0.718<sup>83</sup>. Lo que ocurre es que al circular el agua, hace reducir el factor U y el factor g, consiguiendo de este modo acristalamientos con grandes prestaciones y con un alto nivel de luminosidad.

Si además le añadimos temperatura o refrigeramos el agua, en invierno y en verano respectivamente, se consigue que el acristalamiento funcione como un radiador energético, haciendo subir o bajar la temperatura del interior del recinto. En invierno, se haría recircular agua a temperatura unos grados centígrados superior a la temperatura deseada por el usuario, de modo que este exceso de temperatura del agua sería radiado al interior, a través del fenómeno de conducción. Lo mismo ocurriría en verano. Al estar el agua en circulación, evitaríamos un sobrecalentamiento o un sobre enfriamiento excesivo del agua y que pudiera afectar al confort establecido.

Por lo tanto para analizar las prestaciones del vidrio con cámara de agua se van a comparar con aquellas de los vidrios de control solar y bajo emisivo. Por lo tanto es preciso estimar en condiciones de intemperie real las siguientes prestaciones:

- Capacidad del vidrio con cámara de agua para mejorar las prestaciones de los vidrios de control solar en caso de ganancias excesivas (solsticio de verano). El parámetro esencial a medir es la temperatura interior alcanzada en la cámara.

<sup>79</sup> T.t. Chow et al. Sol Energy Mater. Sol. Cells (2009).

<sup>80</sup> Las partículas siguen trayectorias definidas, y todas las partículas que pasan por un punto en el campo del flujo siguen la misma trayectoria. Este tipo de flujo fue identificado por O. Reynolds y se denomina "laminar", queriendo significar con ello que las partículas se desplazan en forma de capas o láminas.

<sup>81</sup> Al aumentar el gradiente de velocidad se incrementa la fricción entre partículas vecinas al fluido, y estas adquieren una energía de rotación apreciable, la viscosidad pierde su efecto, y debido a la rotación las partículas cambian de trayectoria. Al pasar de unas trayectorias a otras, las partículas chocan entre sí y cambian de rumbo en forma errática. Éste tipo de flujo se denomina "turbulento"

<sup>82</sup> Según conversaciones con Intelliglass.

<sup>83</sup> Datos obtenidos de la simulación de un vidrio con agua en DesignBuilder

- Capacidad del vidrio con cámara de agua para mejorar las prestaciones de los vidrios bajo emisivos en caso de pérdidas (solsticio de invierno). El parámetro a medir es la temperatura interior de la cámara.
- Otra posibilidad es la aportación energética y de inercia térmica en diferentes situaciones. En este caso el parámetro fundamental a medir es la temperatura del agua.

En consecuencia tanto el plan de simulaciones como el de ensayos físicos se plantearán con el objeto de realizar estas comparaciones en condiciones reales de intemperie, más concretamente las del clima madrileño que por sus características es representativo de zonas de clima templado con situaciones exigentes tanto a las ganancias como con respecto a las pérdidas térmicas, lo cual incide directamente en consumo energéticos por aire acondicionado y calefacción.

**INDICE CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA DOCUMENTAL**

<b>5.METODOLOGÍA DOCUMENTAL.....</b>	<b>131</b>
5.1. SELECCIÓN DE LOS TIPOS DE VIDRIOS .....	132
5.2. PROGRAMAS DE SIMULACIÓN .....	133
5.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	134
5.4. CONCLUSIONES PARCIALES .....	134



## 5. METODOLOGÍA DOCUMENTAL

La metodología documental empleada consiste en extraer, mediante el análisis de la documentación consultada, aportaciones valiosas para la investigación planteada.

Al contrario que en otras disciplinas, la información la información técnica disponible se haya dispersa, por lo que hay que recurrir a gran variedad de fuentes con objeto de recabar la información que se refiere en cada caso. De este modo se han identificado las siguientes fuentes:

1. Artículos en revistas científicas de impacto.
2. Bibliografía especializada.
3. Tesis doctorales consultadas.
4. Informes realizados en el seno de proyectos de Investigación: Solar Decathlon SD 2007 e INVISIO.
5. Informes realizadas en estancias de investigación en el extranjero, específicamente en la Università di Roma, La Sapienza: Altra Economia y Accademia di Belle Arti.
6. Información técnica procedente de páginas webs institucionales (ver bibliografía).
7. Información técnica procedente de páginas webs comerciales (ver bibliografía).

Esta relación se ha hecho por orden de fiabilidad de las fuentes, por lo que el nivel de análisis científico de las informaciones procedentes de ellas está en consonancia con su calidad científica.

El método de trabajo ha consistido en recabar información sobre los temas propuestos en los objetivos particulares de la metodología documental, es decir, esencialmente en lo relativo a la eficiencia energética de los acristalamientos, a las características de los vidrios dinámicos y su aportación a la misma, y a los métodos de simulación y experimentales adecuados para su estudio.

Tras comparar los datos obtenidos de las diversas fuentes se obtienen una serie de conclusiones parciales que han permitido documentar los siguientes aspectos:

- Estado de la técnica y de la investigación: Muy difícil de establecer a priori sin una completa búsqueda documental como la realizada.
- Planteamiento del problema, que entre otras cosas permite saber qué tipos de vidrios se deben estudiar y que prestaciones específicas son las que conviene analizar.
- Metodología de la simulación, para seleccionar los programas de simulación adecuados y conocer en profundidad las posibilidades que ofrecen.

- Metodología experimental, para conocer las experiencias previas en este campo y poder diseñar un ensayo que recoja las aportaciones de la experiencia.

A continuación se desarrolla más concretamente cada aspecto de la metodología documental empleada según los diferentes objetivos particulares de la misma.

### 5.1. SELECCIÓN DE LOS TIPOS DE VIDRIOS

Para la selección de qué tipos de vidrio pueden aportar alguna mejora en cuanto a eficiencia energética se refiere, se han consultado diversos documentos en función de los temas estudiados que se refieren a continuación.

Para el estudio de la eficiencia energética general de los acristalamientos, se ha examinado bibliografía especializada ya existente, con el fin de estudiar los factores básicos que nos ayudan a definir las cualidades o defectos básicos del vidrio por un lado, y sus parámetros ópticos y energéticos por otro, con el objeto de analizar si el vidrio puede ayudarnos a alcanzar un confort ambiental ideal con un ahorro energético apreciable.

Las fachadas de doble piel de vidrio, son una solución constructiva que según documentación consultada en el seno del proyecto de investigación INVISIO, puede mejorar la eficiencia energética de la envolvente, pudiendo incorporar diferentes tipos de vidrios tanto estáticos como dinámicos.

Para comprobar el comportamiento de distintos tipos de acristalamientos en condiciones reales se ha realizado una comparativa a partir de los datos de monitorización publicados por el DOE para las casas participantes del concurso Solar Decathlon 2007. Esta comparativa se ha hecho a propósito para la tesis ya que todos los datos estaban en bruto. Su análisis nos ha permitido tener una lectura más clara del comportamiento energético del acristalamientos de dichas viviendas.

Ya más específicamente en el tema de los vidrios, para documentar las prestaciones técnicas de los vidrios convencionales, se han estudiado diversas tesis doctorales, especialmente las consultadas durante mi estancia de investigación en la Università di Roma "La Sapienza", destacando entre otras, la tesis doctoral del ingeniero Michele Zinzi, de la agencia italiana ENEA, por el estado de la técnica tan completo desarrollado.

Sin embargo, para la documentación de los vidrios cromogénicos, debido al tema tan poco estudiado y documentación tan dispersa encontrada en la literatura, generalmente americana, se ha tenido que acudir principalmente al estudio de artículos publicados en revistas de impacto y congresos de prestigio, tal y como se documenta en la bibliografía y en el estado de la técnica anteriormente expuesto. De entre los artículos más destacados se ha de seleccionar entre otros los desarrollados a partir del LBNL, dirigidos por Stephen Selkovitz.

Dentro de los vidrios dinámicos, los vidrios con cámara de agua, a los que se dedica gran parte de esta investigación, especialmente por ser aquellos que teóricamente ofrecen unas prestaciones más altas, la documentación analizada se concentra



prácticamente en bibliografía especializada para el estudio del agua frente a la radiación infrarroja. Por otro, para el estudio del estado de la técnica se ha recurrido a la consulta de patentes y páginas webs (Intelliglass S.L., Mckee Fluidized Glazing) como documentación única. Para el análisis del estado de la investigación de este tipo de vidrios que se pueden incluir dentro de los vidrios dinámicos, se ha encontrado una serie de artículos en revistas de impacto publicados por la Universidad de Hong-Kong (Tin Tai Chow), en el que como ya se ha comentado en el capítulo I, y tras análisis numéricos y de simulación, y en ningún caso experimental, sostiene que los vidrios con cámara de agua aventajan en todas sus prestaciones a los vidrios cromogénicos<sup>84</sup>.

Finalmente se han obtenido las conclusiones parciales que se presentan en el capítulo I que permiten dar a conocer a partir del estado de la técnica y de la investigación desarrollado qué tipo de vidrio, según las condiciones teóricas, tiene unas prestaciones energéticas superiores al resto.

## 5.2. PROGRAMAS DE SIMULACIÓN DISPONIBLES

Para el desarrollo del Concurso Solar Decathlon 2007, ya desde mayo de 2006, comenzamos a estudiar diversos programas de simulación, para la realización de la simulación energética del prototipo de casa solar presentado para el concurso. Tras numerosas consultas, se elige finalmente el programa Ecotect.

Para la selección de qué programa de simulación energética es el adecuado para enfrentarnos al problema de definición de un modelo sencillo de simulación de ensayos experimentales y de algún modo llegar a eliminar o sustituirlos, primeramente se estudió la página web del DOE<sup>85</sup>, donde se encuentra una lista de todos los programas de simulación energéticas existentes, y las características de cada uno de ellos.

Durante mi estancia de investigación en la Università di Roma, La Sapienza, tuve la oportunidad de averiguar acerca de diversos programas de simulación utilizados. Las investigaciones en el ENEA<sup>86</sup>, fundamentalmente las dirigidas por Michele Zinzi, son desarrolladas principalmente con el programa TRANSYS, pero que debido a su complejidad no se toma en consideración. Por último, señalar que tras hablar con varios profesores italianos, el programa Ecotect ya resultaba conocido y se impartía docencia, y se llegó a la conclusión de la realización de diversas simulaciones de edificios previamente escogidos que se simularán con dicho programa, analizados en el capítulo 6 (Metodología de la Simulación).

De los programas de simulación energética mediante ordenador analizados en la metodología de simulación (Capítulo 6), principalmente en base a la experiencia, se han encontrado dos: el Ecotect, siempre con el apoyo de los programas Window y Therm, y el DesignBuilder, basado en el motor de cálculo del Energy Plus.

---

<sup>84</sup> (Chow et al., 2010)

<sup>85</sup> [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/subjects.cfm/pagename=subjects/pagename\\_menu=whole\\_building\\_analysis/pagename\\_submenu=energy\\_simulation](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/subjects.cfm/pagename=subjects/pagename_menu=whole_building_analysis/pagename_submenu=energy_simulation)

<sup>86</sup> (Maccari & Zinzi, 2001)

La explicación y desarrollo de estos programas se desarrolla en el Capítulo 6: metodología de simulación.

### 5.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DE REFERENCIA

Para documentar el estudio experimental, más concretamente para diseñar el ensayo, se han analizado experiencias previas que están documentadas en revistas de impacto. Así que se han podido encontrar artículos que reflejan diferentes tipos de ensayos realizados en condiciones de interior [Álvarez (1999)] y en condiciones de exterior [Robinson(1993)], [Jiménez(2008)]<sup>87</sup>. Por motivos de claridad expositiva estos artículos se reproducen en el Anexo 1: artículos, y se expone un resumen razonado de los mismos para a continuación proceder al diseño del ensayo (capítulo 7: metodología experimental ensayos físicos).

Hay que reseñar que lo encontrado al respecto no se adapta exactamente a las necesidades y disponibilidades de esta investigación. De ellos se ha tomado la referencia con respecto a los ensayos de exterior, en condiciones reales de intemperie y la posibilidad de realización de ensayos con una cámara de pequeñas dimensiones.

También se han podido documentar experiencias de toma de medidas en edificios reales en prototipos de viviendas [Zinzi(2006)], que aunque si bien no resultan significativos por no ser factible esta metodología en la presente investigación, se reproduce el artículo en el Anexo 1: artículos, pero se ha realizado un resumen en el capítulo 2 punto 2.4.4. Vidrios cromogénicos. Estado de la investigación puesto que en él se han ensayado vidrios electrocrómicos.

### 5.4. CONCLUSIONES PARCIALES

Los objetivos de la metodología documental, que son la base para el planteamiento del problema, la metodología de la simulación y la metodología experimental, se han alcanzado plenamente, pudiendo llegar a las conclusiones que exponemos a continuación:

- Se ha podido establecer el estado de la técnica y de la investigación con suficiente precisión, aunque si bien se ha tenido que acudir a fuentes de muy diversa índole.
- Se ha aportado el conocimiento existente requerido para hacer el planteamiento del problema, para la selección de los tipos de vidrio a estudiar y las prestaciones a medir, como se va a exponer a continuación en el punto siguiente.
- Se ha hecho una búsqueda suficiente de referencias sobre programas de simulación energética disponible, que permiten la selección del más adecuado para esta investigación.
- Se han encontrado experiencias previas que dan las claves necesarias para realizar un diseño de ensayo adecuado.

---

<sup>87</sup> (Álvarez (1999)) (Robinson(1993)), (Jiménez(2008))

- En la documentación del estado de la técnica y de la investigación se han examinado informes que valoran el impacto energético de los acristalamientos. Muy concretamente se ha realizado un análisis comparativo de los acristalamientos de los prototipos del Concurso Solar Decathlon 2007 en el punto 2.3.2, Prestaciones del cerramiento acristalado de las casas Solar Decathlon 2007, concluyendo que la cantidad de superficie acristalada no es muy relevante si está bien orientada, en la diferencia de consumos energéticos. Se ha observado una gran coincidencia en la utilización de vidrios bajo emisivos y casi ninguna utilización vidrios dinámicos con fines energéticos.



## INDICE CAPITULO 6. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

<b>6.METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.....</b>	<b>139</b>
6.1. RESUMEN .....	139
6.2. SELECCIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN .....	140
6.3. DEFINICIONES .....	141
6.4. INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN .....	145
6.4.1. Modelización. ....	147
6.4.2. Parámetros necesarios para realización de una correcta simulación. ....	148
6.4.3. Archivos climáticos.....	150
6.4.4. Análisis de cerramientos opacos y transparentes. ....	151
6.4.4.1. Caracterización de los vidrios con Window.....	152
6.5. EJEMPLOS DE APLICACIÓN EN EDIFICIOS REALES .....	152
6.5.1. Análisis energético del prototipo "casa solar" Solar Decathlon 2007. ....	154
6.5.2. Edificio "Altra Economía" y "Accademia di Belle Arti". ....	165
6.5.3. Aportación de estas simulaciones .....	173
6.6. CARACTERIZACIÓN Y MODELIZACIÓN DE LOS ENSAYOS FISICOS. ....	174
6.6.1. Modelización del ensayo.....	174
6.6.2. Diferenciación y caracterización de zonas .....	175
6.6.3. Caracterización de materiales opacos.....	176
6.6.3.1. Caracterización térmica con Therm .....	177
6.6.4. Caracterización de materiales transparentes en Ecotect.....	179
6.6.5. Análisis y simulación .....	180
6.6.6. Errores y fallos detectados en el programa de simulación.....	184
6.7. SIMULACIONES .....	190
6.7.1. Modelización y desarrollo .....	190
6.7.2. Ciclo de simulaciones.....	194
6.7.2.1. Simulaciones a captación.....	195
a) Ensayos a oeste .....	196

b) Ensayos a este.....	198
6.7.2.2. Simulaciones a Pérdidas .....	200
c) Ensayos a sur .....	201
6.8. CONCLUSIONES PARCIALES .....	207

## 6. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

### 6.1. RESUMEN

En este capítulo se realiza el proceso de simulación informática con objeto de alcanzar los objetivos propuestos para esta fase.

Una de las dificultades fundamentales en el desarrollo de esta investigación es precisamente la medición y cuantificación de la eficiencia energética de los cerramientos en los edificios.

Tal y como se ha comentado anteriormente el objetivo general de esta tesis se trata del estudio de la eficiencia energética en los acristalamientos y por tanto de la puesta a punto de métodos de estudio prácticos y eficaces para determinar las prestaciones energéticas de diferentes tipos de vidrio.

Como se ha comentado en el capítulo II: Objetivos, existen dos métodos con el fin de llevar a cabo este objetivo: por un lado el práctico, del cual nos ocuparemos en el punto siguiente y el teórico, mediante cálculos numéricos y programas de simulación informática, descritos entre otros en el CTE, los que describiremos en el presente punto.

Como se sabe el trabajo con programas de simulación reviste una complejidad importante, que va desde la modelización y construcción de modelos sencillos, caracterización e introducción de los materiales hasta la interpretación de resultados obtenidos mediante el programa. Se trata por tanto de observar la fiabilidad de estos resultados obtenidos comparándolos a su vez con ensayos físicos con el fin de contrastar la información obtenida en ambos procesos.

Dada la complejidad y falta de precisión de los estudios realizados a partir de los programas de simulación seleccionados y desarrollados en el siguiente punto, se exponen de manera crítica algunas experiencias realizadas con objeto de explorar las posibilidades reales de esos programas (SD7, Accademia di Belle Arti y Edificio Altra Economia).

Posteriormente se aborda la fase de simulación de vidrios bajo emisivos y de control solar a partir de un modelo coincidente con el ensayo que posteriormente se utilizará en la metodología experimental.

Una vez construidos dichos modelos tridimensionales se compararán los resultados obtenidos en la simulación con aquellos realizados experimentalmente y en segundo lugar extraer conclusiones sobre la fiabilidad de estos programas de simulación y su capacidad de reproducir situaciones reales. Esto es de gran importancia ya que el realizar simulaciones por ordenador es mucho más rentable en tiempo, esfuerzo y dinero, que realizar ensayos físicos.

Por último, un programa de simulación es adecuado incluso, como se expondrá, para determinar características sobre la colocación de una capa metálica en cara 2 o en cara 3 y determinar su comportamiento energético en base a su colocación.

## 6.2. SELECCIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN

La selección de los programas de simulación se ha basado en la experiencia adquirida en los últimos años, tal y como se ha comentado previamente en la metodología documental.

El programa Ecotect<sup>88</sup> fue seleccionado para el desarrollo de la simulación del análisis energético para el Concurso Solar Decathlon 2007 y 2009 presentadas por la UPM, tras diversas consultas al DOE y a expertos en esta área. Del mismo modo dicho programa fue utilizado para diversas investigaciones dentro del proyecto de investigación singular y estratégico INVISIO de la Universidad Politécnica de Madrid, bajo las direcciones de los grupos de investigación TISE y ABIO. Fue altamente recomendado por Centros de Investigación Tecnológica, como el CIDEMCO, y es utilizado también por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), Entidad Pública Empresarial, adscrita al Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, a través de la Secretaría de Estado de Energía. A nivel internacional, está adscrito a los programas del DOE (U.S. Department of Energy)<sup>89</sup>, y es utilizado y enseñado en más de 60 universidades, principalmente en EEUU, Inglaterra y Australia.

Es un programa que establece un acercamiento conceptual al diseño del edificio incorporando tanto una interface de diseño 3D con un potente motor de análisis, en un sistema interactivo que permite observar el comportamiento energético desde las primeras etapas de concepción del edificio. El programa es capaz de realizar simulaciones térmicas y análisis lumínico tanto natural como artificial, así como estudios de sombras en función del día y de la hora. Está basado en el método CIBSE (Chartered Institute Building Services Engineers) del Reino Unido.

Para un correcto y mejor funcionamiento de dicho programa, se ha contado con el apoyo de otros programas auxiliares Window y Therm<sup>90</sup> pertenecientes y desarrollados por el Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), y recomendados por el Departamento de Energía de los Estados Unidos DOE (US Department of Energy). La elección de dichos programas se produjo de forma análoga a la del Ecotect y fue altamente recomendado el uso paralelo al Ecotect por expertos del CIDEMCO.

El programa Window, es un programa que se utiliza para la caracterización óptica y térmica de cualquier composición de vidrio, y el Therm está diseñado para el cálculo de la transferencia de calor tanto de cerramientos opacos como de carpinterías.

Otro programa de ayuda es el Ecomat<sup>91</sup>, cuyos algoritmos de cálculo están basados en la norma EN ISO 13786:200792, y es capaz de calcular parámetros tales como

---

<sup>88</sup> Ecotect v.5.6 (2010). (Autodesk).

<sup>89</sup>[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/subjects.cfm/pagename=subjects/pagename\\_menu=whole\\_building\\_analysis/pagename\\_submenu=energy\\_simulation](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/subjects.cfm/pagename=subjects/pagename_menu=whole_building_analysis/pagename_submenu=energy_simulation)

<sup>90</sup> Window v.5.217 y Therm v.5.214 (LBNL). Programas utilizados para la simulación energética realizada para el prototipo de la casa Solar de la UPM, que participó en el Concurso Solar Deathlon en EEUU.

<sup>91</sup> Ecomat v.1.0, desarrollado por AUREA CONSULTING Sustainable Architecture & Engineering.



el Factor U, Admitancia, el desfase térmico y el factor de amortiguación térmico, parámetros no calculados por el programa Ecotect.

El software Ecotect tiene la particularidad que es fácil de aprender y manejar y tiene la desventaja que los métodos de cálculo utilizados, no son los más avanzados en el campo, tal y como indica Hense<sup>93</sup> analizando en su comunicación además una lista de errores de funcionamiento del programa.

Debido a las incoherencias detectadas en los cálculos obtenidos con Ecotect, tal y como predecía Hense nos hemos visto obligados a la búsqueda de un nuevo programa, el DesignBuilder<sup>94</sup>, basado en el motor de simulación del Energy Plus<sup>95</sup>.

El programa DesignBuilder es una herramienta de simulación energética cuyo motor de cálculo es el EnergyPlus, validado por el "IEA BESTEST Building load and HVAC tests", el cual permite entre otros el cálculo de las cargas de calefacción y refrigeración mediante el método de Balance Térmico aprobado por ASHRAE e implementado en Energyplus, este último programa diseñado por el DOE (Department of Energy of USA), y sucesor del DOE-2 y BLAST, siendo el programa que ha obtenido más certificados y validaciones.<sup>96</sup>

Éste, aparecido recientemente en el mercado, se ha mostrado como el más idóneo para llevar a cabo dichas simulaciones.

(Para más información de todos los programas descritos ver Anexo 3: metodología de simulación). Programas de simulación.

### 6.3. DEFINICIONES

Para facilitar la comprensión de este capítulo se aportan definiciones de todas las variables y parámetros que son requeridos para la realización de las simulaciones.

La información se organiza en dos bloques: en la caracterización de cerramientos transparentes y opacos.

#### CARACTERIZACIÓN DE CERRAMIENTOS TRANSPARENTES

- Admitancia térmica: En régimen dinámico (cuando la temperatura no es constante) se define como admitancia térmica de un cerramiento como la relación entre la oscilación del flujo de calor que atraviesa una cara del cerramiento y la oscilación de temperatura que provoca en el ambiente adyacente. Representa la potencia energética necesaria para hacer oscilar un grado la temperatura. La Norma EN ISO 13786 prescribe utilizar el

<sup>92</sup> "Thermal performance of building components, Dynamic thermal characteristics - Calculation. Methods", en la que se basa el método CIBSE y en éste, el método de cálculo térmico de Ecotect.

<sup>93</sup> (Hensen & Radošević, 2004)

<sup>94</sup> DesignBuilder V. 2.04.002 (2009). (DesignBuilder Software Ltd).

<sup>95</sup> EnergyPlus Version 4.0.0 Build 024 es un programa de simulación térmica y energética de edificios desarrollado por DOE (Department of Energy, Estados Unidos), que actúa como motor de cálculo, dependiente o independientemente de otros programas.

<sup>96</sup> Ver lista de validaciones del motor de cálculo Energy Plus en: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/testing.cfm>.

símbolo  $Y_m$  para representar la admitancia de un cerramiento (en donde  $m$  representa la cara sobre la que se desea dar el valor, normalmente la cara interior o exterior del cerramiento). Se expresa en  $W/m^2 \cdot K$ .

- Calor específico. (c). Es el parámetro que permite caracterizar a los materiales haciendo referencia a la capacidad para acumular calor en su masa. Se define como calor específico de un material a la cantidad de calor que es preciso suministrar a una unidad de peso del material para incrementar su temperatura en una unidad. En el Sistema Internacional se utiliza como unidad el MJ/kg.
- Conductividad térmica ( $\lambda$ ). Es el parámetro que se utiliza para caracterizar a los materiales haciendo referencia a la capacidad para transmitir el calor. La conductividad térmica es el flujo de calor que, en régimen estacionario, atraviesa un material de caras plano-paralelas de espesor unitario durante una unidad de tiempo cuando la diferencia de temperatura entre sus caras es de una unidad. La unidad de conductividad térmica en el Sistema Internacional es el  $W/(m \cdot K)$

$$Q = \lambda \times \Delta T$$

- Coeficiente de Transmisión Térmica (Factor U): Es el parámetro que permite caracterizar a los elementos constructivos por lo que hace referencia a su capacidad para transmitir el calor (grado de aislamiento). Se define como la cantidad de calor que atraviesa un elemento de construcción de superficie unidad durante una unidad de tiempo cuando la diferencia de temperaturas entre sus caras es de una unidad. Según el CTE-HE1: "Es el flujo de calor, en régimen estacionario, dividido por el área y por la diferencia de temperaturas de los medios situados a cada lado del elemento que se considera". Unidades en el SI:  $W / m^2 \cdot ^\circ K$ . Coeficientes de transmisión térmica muy bajos indican aislamientos elevados.

Normativa de aplicación: EN: 673. Vidrio en la construcción. Determinación del coeficiente de transmisión térmica, U.

$$\frac{1}{U} = R_E + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + R_i$$

Las resistencias térmicas superficiales ( $R_e$ ,  $R_i$ ) representan la dificultad a la transmisión de calor que se produce por cambio de un medio transmisor a otro (del aire al elemento constructivo o viceversa).

- Factor de sombra ( $Sc$ )<sup>97</sup>: Es la fracción de la radiación incidente en un hueco, que no es bloqueada por la presencia de obstáculos de fachada, tales como retranqueos, voladiza, toldos, salientes laterales u otros. Mientras más bajo sea el valor de SC, más eficiente es el control solar del sistema de vidriado. El coeficiente de sombra se calcula dividiendo el factor solar por 0.87, que corresponde al factor solar de un cristal incoloro de 3mm de

---

<sup>97</sup> Normativa de aplicación EN-410. Vidrio para la edificación. Determinación de las características luminosas y solares de los acristalamientos.

espesor. El C.S de un cristal de 3mm es 1. En cerramientos opacos este valor se relaciona con la absorción solar.

$$S_c = \frac{g}{0.87}$$

Según el CTE - HE1, "es la fracción de la radiación incidente en un hueco que no es bloqueada por la presencia de obstáculos de fachada tales como retranqueos, voladizos, toldos, salientes laterales u otros".

- Color: Expresa la cantidad de luz absorbida o reflejada por una superficie, en función de la longitud de onda. En Ecotect se define el color de las superficies externas e internas de un material introduciendo las coordenadas RGB (valor numérico que indica la cantidad de Rojo, Verde y Azul que contiene un color).<sup>98</sup>
- Emisividad (E): Según el CTE-HE1, lo define como la "*capacidad relativa de una superficie para radiar calor*". Los factores de emisividad van de 0,0 (0%) hasta 1,0 (100%). En otras palabras, se refiere a la capacidad del edificio a reflejar la radiación infrarroja de onda larga. Es un valor dado entre 0 y 1. Medida de la capacidad de una superficie de absorber o reflejar la energía radiante. Cuanto menor es el valor nominal de emisividad, mayor es la característica de aislamiento del sistema de vidriado en relación con la pérdida de calor.

Un vidrio bajo emisivo es un vidrio monolítico sobre el que se ha depositado una fina capa de óxidos metálicos, capaz de proporcionar al vidrio una capacidad de aislamiento térmico reforzado. Normalmente estos vidrios deben ir ensamblados en un doble acristalamiento ofreciendo así sus máximas prestaciones de aislamiento térmico.

- Emitancia de infrarrojos capa exterior onda larga. Emisividad hemisférica (reflectancia de onda larga) de la cara exterior.
- Emitancia de infrarrojos capa interior onda larga. Emisividad hemisférica (reflectancia de onda larga) de la cara interior.
- Especularidad: Se refiere a la naturaleza de difusión de una superficie, y es la inversa de la rugosidad (ver definición más abajo). Es un valor entre 0 y 1, donde 0 representa completa difusión (superficie rugosa) y 1 representa un perfecto espejo.
- Factor Solar (g)<sup>99</sup>: Según El Manual del vidrio, el factor solar es: "*la relación entre la energía total que entra en el local a través de dicho acristalamiento y la energía solar incidente. Esta energía total es la suma de la energía solar que entra por transmisión directa y la energía cedida por el acristalamiento al espacio interior, tras su calentamiento por absorción energética*". Cuanto más bajo sea el factor solar, menores serán las aportaciones solares.

<sup>98</sup> IEC 61966-2-1 (1999-10), *Multimedia systems and equipment — Colour measurement and management — Part 2-1: Colour management — Default RGB colour space — sRGB*

<sup>99</sup> Normativa de aplicación EN-410. Vidrio para la edificación. Determinación de las características luminosas y solares de los acristalamientos.

- Ganancia solar o en inglés "Alternating Solar Gain" (Alt SG): fracción de radiación oscilante que acaba transformándose en carga interna. Va en función del factor de superficie de la zona, Alt SG (Heavyweight) si es pesada, y si es ligera, deberá utilizar el Alt Solar Gain (Lightweight), usando solo una en función del tipo de forma.
- Índice de refracción: Se refiere a la propiedad del vidrio que afecta a la luz incidente, y por lo tanto a la radiación solar y sombras. Adimensional. Valores en tanto por ciento o tanto por uno (0-1).
- $L^*a^*b$  (CIELAB color space) de la Tv. Espacio de color del CIELAB (CIE 1976  $L^*a^*b^*$ ). Es el modelo cromático usado normalmente para describir todos los colores que puede percibir el ojo humano. Los tres parámetros en el modelo representan la luminosidad de color ( $L^*$ ,  $L^*=0$  rendimientos negro y  $L^*=100$  indica blanca), su posición entre magenta y verde ( $a^*$ , valores negativos indican verde mientras valores positivos indican magenta) y su posición entre amarillo y azul ( $b^*$ , valores negativos indican azul y valores positivos indican amarillo).<sup>100</sup>
- Reflectancia solar. Cantidad de energía solar (visible, infrarroja y ultravioleta) reflejada por la ventana, expresada como porcentaje. Podemos diferenciar dos valores: de la capa externa e interna.
- Reflectancia visible ( $R_v$ ). Cantidad de luz visible reflejada por la ventana, expresada como porcentaje. Un valor nominal de  $R_v$  más alto brinda un mejor control del resplandor. Las películas con valores nominales más altos tienden a ser más reflexivas y/o más oscuras. Podemos diferenciar dos valores: capa externa e interna.
- RGB. Los parámetros (Red, Green, Blue: "rojo, verde, azul") de un color hace referencia a la composición del color en términos de la intensidad de los colores primarios con que se forma: el rojo, el verde y el azul.<sup>101</sup>
- Rugosidad: Este valor se refiere al grado de imperfección de una superficie. Un valor 0 representa una superficie perfectamente lisa y plana, y 1 indicaría una superficie extremadamente ondulada.
- Solar Heat Gain Coefficient o Ganancia de Calor Solar (SHGC): Su valor, entre 0 y 1, representa la relativa cantidad de radiación solar que pasa a través de un material comparado con un vidrio flotado incoloro 3 mm. A valores más cercanos a 0, más baja es su transmisión solar y por tanto las propiedades de control solar de la película.

$$SHGC = S_c \times 0,87 / T_v$$

- Transmitancia solar ( $T_s$ ). Cantidad de energía solar (visible, infrarroja y ultravioleta) que atraviesa la ventana, expresada en porcentaje.
- Transmitancia de infrarrojos de onda larga ( $T_{ir}$ ). Cantidad de radiación infrarroja de onda larga, que atraviesa la ventana, expresado en porcentaje.

<sup>100</sup> Norma UNE 72.031: 83. Magnitudes colorimétricas.

<sup>101</sup> Basado en el Espacio de Color del CIE 1931.

- Transmitancia de infrarrojos de onda corta (Tir). Cantidad de radiación infrarroja de onda corta, que atraviesa la ventana, expresado en porcentaje.
- Transmitancia visible (Tv): Este valor representa la cantidad de luz visible transmitida a través de material, expresado en porcentaje. Un valor nominal de Tv más bajo tiende a controlar mejor el resplandor, mientras que se prefiere un valor nominal más alto para mantener la luz natural. Valores en tanto por ciento o tanto por uno (0-1).

#### CARACTERIZACIÓN DE CERRAMIENTOS OPACOS

- Absorción solar: Se refiere a la energía solar incidente que es absorbida por la superficie y que no es reflejada ni transmitida. Este parámetro afecta al cálculo térmico a través de la ganancia solar indirecta y la temperatura del aire. En ventanas, este valor se relaciona con el coeficiente de sombra. Valor entre 0 y 1.
- Transparencia. Este valor define la cantidad de luz visible transmitida a través del material. Para materiales opacos este valor es 0, mientras que para un vidrio, puede llegar a ser hasta 0.96.
- Desfase térmico: Retraso térmico: El retraso térmico o comúnmente llamado en inglés "*Thermal Lag*" de un edificio es el tiempo que tarda la temperatura máxima en atravesar el material, y es responsable de la inercia térmica<sup>102</sup> de un material. Se mide en horas.
- Factor de amortiguación térmico: En régimen dinámico (cuando la temperatura no es constante) indica la relación entre la oscilación de la temperatura exterior y la oscilación de la temperatura interior. Representa el rango de fluctuación de temperaturas en una cara de un material comparado con el otro. Es la reducción de la temperatura cíclica en la superficie interior en comparación con la superficie exterior. Por ejemplo, un material con un valor de desfase térmico de 0,5 que experimenta una variación diurna de 20 grados en la temperatura de la superficie externa experimentará una variación de 10 grados en la temperatura de la superficie interior. Se da siempre en un rango de 0 a 1. Factores altos indican temperatura interiores muy estables.

El procedimiento de cálculo del factor de amortiguación y desfase de un cerramiento partiendo de la naturaleza y espesores de cada una de sus capas se detalla en la Norma EN ISO 13786 (se trata de un cálculo matricial sobre números complejos que suele exigir la utilización de herramientas informáticas, como por ejemplo el Ecomat v.1.0.

#### 6.4. INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN

Con objeto de facilitar la comprensión de los procesos de simulación realizados, se hará en este punto una exposición de los programas utilizados y de las condiciones

---

<sup>102</sup> Se denomina inercia térmica de un cerramiento o un edificio o local al conjunto de características térmicas dinámicas del mismo.

y pasos necesarios para una correcta modelización y posterior simulación energética de un edificio o cámara de ensayo mediante programas informáticos. En este capítulo se desarrollarán los requisitos para una correcta modelización, los parámetros necesarios para la realización de una correcta simulación, los archivos climáticos necesarios, y por último las claves para la realización de un análisis óptimo tanto de los cerramientos opacos como transparentes.

Antes de comenzar a hablar de los programas de simulación que se van a utilizar, se introducirán brevemente los requerimientos en España en cuanto a Certificaciones Energéticas, y por consiguiente, el uso de programas de simulación energética, con el fin de elegir el más adecuado. El Código Técnico de la Edificación (CTE) es el marco normativo español que establece las exigencias básicas de los edificios que cumplen los requisitos básicos definidos por la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) en España, marcando un antes y un después en relación a las simulaciones informáticas como instrumentos metodológicos reconocidos para la justificación de sus documentos básicos.

Los programas, que actualmente son herramientas de trabajo que de forma obligatoria deben justificar el cumplimiento de uno de los documentos básicos del CTE, y por tanto capaces de obtener la calificación energética de un edificio. Las herramientas informáticas para tal fin en España son el LIDER o CALENER, promovidas por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, a través del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) y por el Ministerio de Vivienda permitiendo verificar la demanda de energía de los edificios así como la eficiencia energética de los mismos.

Para la presente investigación se han utilizado como programas de simulación energética el Ecotect, y posteriormente el DesignBuilder. Aunque estos análisis no se han usado con el fin de la certificación energética, para un futuro próximo y análisis más exhaustivos, es conveniente saber si están reconocidos por el CTE.

Según el CTE, la obtención de la calificación energética de un edificio puede realizarse mediante la utilización de un programa informático de Referencia (LIDER o CALENER) o de un programa informático alternativo, que constituyen la denominada Opción General de Calificación Energética de un Edificio, de acuerdo con el artículo 4º del Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción. En este punto es donde entrarían los programas anteriormente citados.

Recientemente se ha aprobado el Documento de Aceptación de Programas Alternativos<sup>103</sup> en el cual selecciona entre otros el programa Energy Plus (motor de cálculo que utiliza el DesignBuilder) como herramienta fiable para la Certificación energética de soluciones singulares en Edificios, no destinados a viviendas, por lo que se propone también su estudio y su aplicación para el presente estudio, junto

---

<sup>103</sup> "Procedimiento Alternativo para la Certificación Energética de Soluciones Singulares en Edificios no Destinados a Vivienda". (Octubre de 2009) aprobado por la Dirección General de Urbanismo y Política de Vivienda, e Instituto de Diversificación y Ahorro de Energía, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio en el que se aprueba el motor de cálculo Energy Plus para el Método Alternativo para la Certificación Energética (CTE), tal y como indica dicho documento. Ver Anexo 1.

al Ecotect, programa aún no validado, y previo a la aparición del DesignBuilder, pero por considerarlo un programa completo y válido, se va a continuar con su estudio.

Pese a todo, no podemos dejar de un lado la condición de incertidumbre que tiene la aplicación de esta nueva metodología mediante el uso de esos programas de simulación del comportamiento energético de los edificios como se ha podido comprobar en experiencias tales como la simulación energética de los prototipos de casas solares donde se ha podido observar que los resultados de las simulaciones energéticas resultan aún algo aproximativos y su capacidad para predecir consumos energéticos está aún lejos de ser una precisión absoluta.

Previamente a la profundización en el estudio de las simulaciones informáticas para el estudio de la eficiencia energética en vidrios y con el fin de facilitar la comprensión de los siguientes puntos donde se expondrán las simulaciones realizadas, se va a proceder a explicar conceptos previos comunes en las simulaciones realizadas posteriormente, salvo excepciones, que se serán indicadas individualmente en su caso.

#### **6.4.1. MODELIZACIÓN.**

La modelización de un edificio para ser introducida posteriormente en un programa de simulación energética, se realiza generalmente a partir de un programa de dibujo como puede ser el Autocad o 3d Studio Max,(ambos de la casa Autodesk), en tres dimensiones, en donde se han adoptado algunas modificaciones y simplificaciones con el fin de hacer más sencillo el modelo, de forma que reproduzca con la fidelidad suficiente sus características geométricas reales. Para una mayor precisión de cálculo se ha optado por la construcción de un modelo "forma", constituido en su generalidad por partes planas de espesor infinitesimal, leídas como "0" o nulas en el proceso de simulación del programa energético. Se ha prestado particular atención en las juntas y uniones del modelo para no dejar huecos o vacíos superiores a la tolerancia del programa. A la hora de generar el modelo, se dibuja únicamente el volumen interior, es decir los planos que definen los espacios interiores, sin tener en cuenta los espesores de los cerramientos. La generación de los cerramientos es un paso posterior a la modelización, y depende del programa energético, actualizándose automáticamente el espesor.

Por último se le asigna un nombre diferente a cada capa o color. Cada capa distinta, será leída en el programa de simulación como una zona distinta. Las zonas, son volúmenes homogéneos de aire, encerrados en sí mismo, y que actuarán con especificaciones térmicas comunes (temperatura de confort, climatización etc.)

El mejor formato de intercambio para exportar un modelo 3d realizado en programas "cad" al Ecotect, después de numerosas pruebas ha resultado ser el de la extensión "3ds" perteneciente al programa 3d Studio Max, realizado a partir de este último programa, o partir de Autocad (mejor v.2006) y posterior exportación a extensión 3ds.

Una vez importado el modelo, se redibuja en caso que sea necesario con las posibilidades de grafismo y de dibujo que ofrece el programa en cuestión, en este

caso el Ecotect, con el fin de obtener una simulación correcta, sin errores, habiendo revisado que las superficies están unidas, y no hay espacios entre ellos, de modo que el programa no lo entienda como aperturas por las que pueda entrar el aire.

El proceso habitual de modelización consta pues de dos partes: construir o modelar un modelo simplificado lo más preciso posible a la configuración física de la construcción (envolvente, muros, cubiertas) y obtenido ésto, analizar de manera individual, los aspectos más relevantes que interesan y que afectan en mayor cuantía al proceso de la simulación energética. Una simulación energética nunca va a funcionar igual que comportamiento energético real, por lo que se tendrá que buscar la simplificación energética lo más cercana a la realidad.

Para modelos sencillos se han usado las cámaras de nuestro ensayo físico, realizando la construcción del modelo directamente con las herramientas de dibujo que ofrecen estos programas y evitando la construcción con programas externos evitando de este modo los errores de exportación.

Debemos tener en cuenta en todo momento, las limitaciones operacionales de los programas, ya que, en múltiples casos, mientras más variables introducimos, más se ralentiza la simulación, requiriendo a menudo potentes equipos y tiempos de simulación prolongados.

#### **6.4.2. PARÁMETROS NECESARIOS PARA LA REALIZACIÓN DE UNA CORRECTA SIMULACIÓN.**

Antes de comenzar con el estudio de las simulaciones, es necesario describir los parámetros y datos necesarios para el desarrollo de una correcta simulación, extraídos de la Guía CIBSE 2006 <sup>104</sup>.

- Localidad.
- Condiciones internas de diseño. Son la temperatura interior de bulbo seco y la humedad relativa interior, especificadas para el cálculo de una carga de diseño. Con ellas se define una temperatura de confort así como la temperatura operativa, que van en función de la temperatura del aire, temperatura radiante y velocidad del aire.
- Establecimiento de criterios de sobrecalentamiento apropiados, en sistemas de refrigeración mecánicos no activos.
- Condiciones exteriores de diseño. Son la temperatura exterior de bulbo seco y la humedad relativa exterior del ambiente donde se requiere calcular la carga de diseño. Los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), deben contrarrestar las fuerzas del tiempo cuando la temperatura al aire libre (temperatura del ambiente exterior) o humedad se mueve en un rango aceptable en favor de la seguridad y comodidad (confort). Por consiguiente, un entendimiento claro del comportamiento del tiempo es útil para diseñadores y operadores de estos sistemas.

---

<sup>104</sup> Capítulo V, punto 5.4, Guía CIBSE 2006.



- Infiltración y ventilación. El aire del exterior que fluye a través de una edificación, ya sea como aire de ventilación, o no intencionalmente como infiltración es importante por dos razones. El aire del exterior es utilizado muchas veces para diluir contaminantes en el aire del interior y la energía asociada con calentamiento o enfriamiento de este aire exterior es una significativa carga de relación espacio - acondicionamiento. La magnitud de estos valores de flujo de aire debe ser conocida para estimar adecuadamente el consumo de energía. El intercambio de aire entre el interior y las afueras está dividido en: ventilación (intencional e idealmente controlada) e infiltración (no intencional y descontrolada). La ventilación puede ser natural y forzada. Una buena estrategia de ventilación a partir de las condiciones climáticas exteriores puede reducir hasta en un 50% las cargas energéticas.
- Cargas internas: es la cantidad de energía que se requiere vencer en un área para mantener determinadas condiciones de temperatura y humedad para una aplicación específica (ej. Confort humano). Dividimos en:
  - o Concentración de personas como base de diseño. Las personas que ocupan el espacio que debe ser acondicionado contribuyen con cantidades importantes de calor sensible y calor latente, que aumentan la carga total de enfriamiento de dicho espacio.
  - o Cargas térmicas originadas por equipos instalados en el interior de un espacio a acondicionar. Entre las fuentes de calor dentro del espacio que será condicionado están las luces, las maquinas de oficina, equipos de computación, los electrodomésticos y los motores eléctricos. Con respecto al alumbrado, el mismo constituye una fuente de calor sensible. Este calor se emite por radiación, convección y conducción.
- Caracterización de los cerramientos opacos. Las propiedades de los materiales usados en la construcción de un edificio son la clave para determinar la respuesta energética de un edificio en un clima determinado. Se definen dos tipos de propiedades: fundamentales, que son los parámetros relacionados con el material e invariables (densidad, calor específico, conductividad térmica y resistencia, absorptividad, emisividad...) y los derivados, que son los generados por el propio usuario a raíz de la diversa composición de los materiales, obteniendo así su Factor U, admitancia térmica, retraso térmico, factor de amortiguación térmico...).
- Geometría del edificio. La forma de un edificio interviene de manera directa en el aprovechamiento climático del entorno, a través de dos elementos básicos: la superficie y el volumen. Con relación a la superficie de la vivienda, por los intercambios de calor entre el exterior y el interior de un edificio, a mayor superficie más capacidad para intercambiar calor entre exterior e interior. El volumen del edificio está directamente relacionado con la capacidad para almacenar energía: a más volumen, más capacidad para almacenar calor. Una manera de cuantificar la relación entre la forma de un edificio y su capacidad para intercambiar calor con el exterior, es tomar en consideración el factor de forma, que es el cociente entre la superficie del

edificio y su volumen. Para climas fríos conviene un pequeño factor de forma, entre 0,5 y 0,8, mientras que para climas cálidos conviene uno grande, superior al 1,2.

#### **6.4.3. ARCHIVOS CLIMÁTICOS**

La clave para una simulación precisa del comportamiento energético y lumínico de los edificios, son los datos aportados por los archivos climáticos.

Los datos recogidos de las estaciones meteorológicas son tratados y posteriormente compilados y reunidos en una base de datos que dan lugar a un año típico meteorológico que incluye datos horarios de diversos parámetros.

Un formato estándar de dicha preparación que ha sido desarrollado por la mayoría de las sociedades encargadas de su realización, como ASHRAE, es el llamado TMY2 (Typical Meteorological Year 2). Para preparar el de una localidad particular, se necesitan los datos horarios de al menos 10 años, que luego son analizados con el fin de determinar los valores medios de cada mes. Se selecciona a continuación el mes más representativo de todos, que pasará a constituir un mes de los datos horarios anuales. El primero y último día de cada mes, son modificados para hacer mas suave las transicciones de un mes a otro. Los archivos TMY2, son las bases de datos que están disponibles de las mayorías de las localidades del mundo.

Los diferentes programas de simulación usan distintas extensiones y formatos de archivos climáticos, incluyendo todos ellos un programa de conversión capaz de traducir el archivo base TMY2.

Generalmente, un archivo climático incluye:

- Temperatura de aire seco.
- Temperatura de bulbo húmedo.
- Humedad relativa.
- Presión atmosférica.
- Velocidad del viento,
- Dirección del viento.
- Radiación directa
- Radiación difusa
- Radiación global.
- Radiación horizontal infrarroja.

Cada localidad es definida además por su longitud, altitud y por su altura sobre el nivel del mar.

Los archivos climáticos usados por el Ecotect y el DesignBuilder (extensión Energy Plus/ESP-r (E/E) y EPW), están basados en el TMY2, pero han sido rediseñados

para facilitar una mejor visualización de los datos, utilizando generalmente un formato de lectura en CSV<sup>105</sup>. El resto de los programas, como puede ser el Ecotect, son capaces de abrir estos archivos y guardarlos posteriormente en el tipo de archivo correspondiente (extensión WEA en caso de Ecotect).

Estos archivos son tramitados a través de la Organización Mundial Meteorológica (World Meteorological Organization), por países y regiones. Los datos para España son desarrollados hoy día por dos fuentes o institutos. Los desarrollados por Spanish Weather for Energy Calculations (SWEC<sup>106</sup>) e International Weather for Energy Calculations (IWEC<sup>107</sup>), el primero desarrollado por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, y el segundo por ASHRAE. En nuestro caso, se han utilizado los de IWEC, por ser los más recomendados y fiables ya que en los archivos SWEC faltan los datos de viento.

La página web del Energy Plus, incluye una extensa variedad de países de todo el mundo, donde se pueden descargar los archivos climáticos, en formato EPW.<sup>108</sup>

Para más información ver <sup>109</sup> y Anexo 3 metodología de simulación, (2.3): datos del archivo climático de Madrid, realizado a partir de Ecotect.

#### 6.4.4. ANÁLISIS DE CERRAMIENTOS OPACOS Y TRANSPARENTES.

Como se ha comentado previamente, el programa de base seleccionado para la realización de las simulaciones energéticas análogas a los ensayos físicos, ha sido primero el programa Ecotect y posteriormente el DesignBuilder, debido a errores de los algoritmos de cálculo encontrados en el primero. Una correcta simulación debe realizarse en dos fases sucesivas, una primera basada en la ejecución de programas de análisis previo en una primera fase (caracterización de cerramientos opacos y transparentes) y el uso de un programa principal de simulación que utilizará los resultados de la primera, para el cálculo definitivo.

Para ver las posibilidades de actuación de estos programas, se ha realizado una caracterización óptica de las composiciones de vidrio ensayadas, cedidas gratuitamente por un fabricante nacional con el fin de compararlos con las

<sup>105</sup> Los ficheros CSV (comma-separated values) son un tipo de documento en formato abierto sencillo para representar datos en forma de tabla, en las que las columnas se separan por comas y las filas por saltos de línea.

<sup>106</sup> SWEC. (Spanish Weather for Energy Calculations) Los datos climáticos para España para cálculos energéticos fueron originalmente desarrollados para el uso de Calener, un programa para la certificación energética español, cubriendo las 52 ciudades españolas. Calener fue desarrollado por el Grupo de Termotecnia e la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla, para el gobierno español. Los archivos climáticos fueron generados usando el programa Climed (software portugués desarrollado por Ricardo Aguiar) por medio de datos mensuales provenientes del Instituto Nacional de Meteorología (Actual Aemet). Estos archivos fueron convertidos formato del Energy Plus, incluyendo como constante de viento una velocidad de 6.7 m/s.

<sup>107</sup> IWEC (International Weather for Energy Calculations), son los resultados del proyecto de investigación 1015 de ASHRAE. Son los típicos archivos climáticos para uso en programas de simulación energética.

<sup>108</sup> [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm)

<sup>109</sup> EnergyPlus Copyright© 1996-2009 The Board of Trustees of the University of Illinois and The Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

parámetros analizados por la empresa aplicando la normativa UNE-EN-410 y 637; y una caracterización térmica del cerramiento opaco de la cámara que se ha utilizado para los ensayos físicos. Los valores obtenidos, se han introducido a posteriori en el programa Ecotect, tanto en los cerramientos transparentes como opacos, al no calcularlos correctamente el programa.

#### **6.4.4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS VIDRIOS CON WINDOW**

Se ha realizado una caracterización de los parámetros de los datos de los vidrios ensayados, con el programa de simulación Window, el cual es capaz de calcular los parámetros principales de las propiedades térmicas y ópticas de cualquier composición de vidrios y de ventanas que queramos generar (valor U, Sc, SHGC, Tv, etc.) a partir de una extensa y actualizada base de datos de vidrios de los principales fabricantes del mundo (IGDB: Internacional Glazing DataBase), desarrollada por el National Fenestration Rating Council (NFRC) y certificada con la ISO 15099 standard y ASHRAE SPC142.

Para una caracterización precisa se han incorporado los parámetros de los vidrios de los vidrios ensayados a la IGDB, introduciendo los siguientes parámetros y convirtiendo las unidades al sistema internacional (SI) y a aquellas que especifica el programa. Señalamos a continuación los datos requeridos:

- Transmitancia solar; Reflectancia solar de la capa; reflectancia solar de la capa interior; Transmitancia visible; Reflectancia visible capa exterior Visible; Reflectancia visible capa interior; Transmitancia de infrarrojos de onda larga; emitancia de infrarrojos capa exterior onda larga; emitancia de infrarrojos capa interior onda larga; conductividad W/mk; parámetros del color en coordenadas RGB.

A la hora de introducir los datos de color, se ha tenido que hacer una conversión de parámetros, pasando las coordenadas de color L\*a \*b (CIELAB COLOR SPACE o CIE 1976) a coordenadas RGB.<sup>110</sup>

Una vez introducidas las características de los vidrios en la base de datos del programa, se procede a la conformación y generación de la composición de los vidrios mediante el programa. Éstos están formados por dos piezas de vidrio de 6mm cada uno a los que se les ha añadido a uno de ellos una capa de óxido de metal x (no especificado) separados por una cámara de aire deshidratado de 12mm, y un segundo vidrio flotado de 6mm., dispuestos paralelamente y formando una sola unidad de vidrio. Para la simulación del vidrio plano flotado se ha utilizado el vidrio comercial de la casa Saint Gobain Glass, Planilux. (Resultados Anexo 3/5).

#### **6.5. EJEMPLOS DE APLICACIÓN EN EDIFICIOS REALES**

Se introducen en este punto ejemplos documentados de simulaciones realizadas sobre edificios reales así como de experiencias interesantes que han aportado un conocimiento más profundo sobre las posibilidades de los programas de simulación.

---

<sup>110</sup> Para más información ver Anexo 3: Metodología de simulación: 1.2. Window 5.217.

La utilidad de las herramientas informáticas de simulación energética para su aplicación en proyectos de arquitectura eficientes energéticamente, buscan por una parte abordar la simulación energética como herramienta de predicción y de investigación y por otro la comprobación de las características establecidas previamente por la experiencia y con los cálculos realizados en su caso.

El objetivo de este estudio, a tiempo pasado, es hacer una crítica constructiva, de sus debilidades o como podría haberse realizado correctamente, en caso de fallo, basándonos en la experiencia adquirida durante estos cuatro años con estos programas. Dichos informes, fueron realizados bajo la presión real y rutina de un estudio de arquitectura o ingeniería, indicando como se hacen estos casos actualmente, al situarnos en la aplicación y realización real de estas simulaciones.

Este punto explica no solo el modo de realización y crítica de estas simulaciones, sino el analizar la influencia energética del tipo de vidrio elegido en una edificación real.

Se trata de estudiar, por tanto, la caracterización energética, por medio de simulaciones por ordenador, de distintos tipos de vidrios, en este caso no dinámicos. La elección del vidrio adecuado, puede influir, como se indicará más adelante, hasta en un 50%, en los resultados finales de cargas térmicas en un edificio, en función de la superficie acristalada del edificio.

La presente tesis doctoral, está basada en el análisis de la influencia energética de distintos tipos de vidrio mediante el desarrollo de una metodología experimental basada en ensayos físicos, tal y como se ha comentado. Este estudio se complementa con las simulaciones por ordenador, tanto de edificaciones reales como la modelización y simulación de los ensayos físicos realizados, ayudándonos al entendimiento y comprensión de dichos resultados.

Los edificios analizados tienen unas condiciones geométricas, de orientación y con un alto porcentaje de superficie acristalada, que los hacen idóneos para este estudio. Serviría, por tanto para observar la influencia de un determinado tipo de vidrio en un edificio.

Para este estudio, que se inició en el 2006, fue fundamental la experiencia adquirida tanto en España como en Estados Unidos, con el concurso Solar Decathlon, y con la estancia en la Universidad di Roma "La Sapienza" en el 2009, bajo la dirección de los arquitectos Luciano Cupelloni y M<sup>a</sup> Caterina Redini, sin los cuales, este estudio no podría haberse completado.

Las experiencias previas adquiridas a través de los programas de simulación durante cuatro años, ha permitido el llegar a comprender no solo un buen funcionamiento del programa, y analizar la influencia energética del tipo de vidrio elegido en una edificación real, llegando a concluir que La elección del vidrio adecuado, puede influir, como se indicará más adelante, hasta en un 50%, en los resultados finales de cargas térmicas en un edificio, en función de la superficie acristalada del edificio.

Los ejemplos elegidos para este estudio y que analizaremos por separado son:

- Prototipo presentado al concurso Solar Decathlon 2007. Washington. EEUU.

- Edificio "Altra Economia". Mattatoio di Testaccio. Roma. Italia.
- Edificio "Accademia di Belle Arti". Mattatoio di Testaccio. Roma. Italia.

Los objetivos principales de la crítica de los informes de las simulaciones energéticas realizadas sería la descripción comportamiento energético de edificios públicos construidos o en proceso de construcción como una herramienta de trabajo, estableciendo para ello una metodología que permita de una forma cómoda y fácil obtener resultados adecuados a según qué parámetros se quieran evaluar y qué objetivos se quieren alcanzar.

- Ofrecer la simulación informática del comportamiento energético de edificios públicos construidos o en proceso de construcción como una herramienta de trabajo.
- En todo modelo a analizar hay que tener en cuenta la complejidad del modelo a simular, y generalmente simplificarlo y adaptarlo a la simulación. La complejidad hace difícil la verificación de la simulación incluso después de tener los resultados reales. Eso lleva a una incertidumbre sobre la precisión del programa, por lo que a veces es necesario una posterior verificación de su precisión con modelos sencillos, como ha ocurrido en el análisis del prototipo Solar Decathlon.

El que se trate de un edificio ya construido o en proceso, influye también bastante como se ha comprobado en la toma de decisiones o modificaciones que se quieran hacer a posteriori. La idea base es que las simulaciones energéticas deben hacerse para que ayuden y colaboren no solo en el proceso edificatorio, sino también en el diseño del edificio. Se debería realizar una futura monitorización, tal y como se ha acordado verbalmente con el profesor Cupelloni, o incluso la realización de esta simulación con otros programas, como puede ser el DesignBuilder que funciona bajo el motor de cálculo del Energy Plus, permitiría la comparación de estas simulaciones con su comportamiento energético en la realidad.

- Evaluar y comparar resultados, con cálculos a mano.

La realización previa de cálculos a mano, nos permite, a la hora de realizar la simulación, evaluar la aproximación del programa de simulación a la realidad, tal y como se ha realizado, en el prototipo Solar Decathlon. La realización de estos cálculos, permitirán de un modo más sencillo la toma de decisiones de estrategias pasivas, como por ejemplo de ventilación, tal y como se ha visto en el cálculo realizado en el punto 4.1, del capítulo III: estudio experimental: simulaciones. En este caso, la simulación sale un 34.8% mejor que el cálculo, debido a las estrategias de sombreamiento, ventilación realizadas, en función de la época del año.

#### **6.5.1. ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL PROTOTIPO "CASA SOLAR" SOLAR DECATHLON 2007.**

La Universidad Politécnica de Madrid diseñó un prototipo de vivienda unifamiliar industrializable que tiene como objetivo conseguir la completa autosuficiencia energética en los ciclos anual y mensual.

Los encargados principales y supervisores de la realización de dicha simulación y posterior informe fueron M<sup>a</sup> del Carmen Giménez Molina y Edwin Rodríguez Ubiñas, por parte del equipo de Arquitectura, y por Eduardo Montoya, por parte del equipo de Ingenieros de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, de la Universidad Politécnica de Madrid. Todos ellos, junto con el resto del equipo SD07 (Solar Decathlon 2007), que sin su ayuda, hubiera sido imposible su elaboración.

Aunque el informe completo "Comprehensive Energy Analysis Report", se adjunta en el Anexo 3: informes simulaciones energéticas. Casa Solar SD7, se ha realizado un resumen comentado de dicho análisis, incluyendo los siguientes apartados.<sup>111</sup>

### Objetivos

Este informe fue preparado para la entrega final del concurso Solar Decathlon 2007, en Julio de 2007, con el fin de mostrar la influencia que el análisis energético ha tenido en el diseño de la casa, y su comportamiento energético anual y semanal (durante la semana del concurso).

El informe consta de dos partes, tal y como se detallaba en el documento Rules and Regulation del Solar Decathlon 2007. 112

Sección I. Influence of Energy Analysis on House Design and Competition Strategies (Influencia del análisis energético en el diseño de la casa y en las estrategias de competición), cuyo objetivo principal es la justificación de dicho análisis en el diseño final de la casa y en el desarrollo de las estrategias de competición, justificando como el análisis energético ha servido para confirmar las decisiones de diseño y estrategias.

En el informe se han analizado los siguientes puntos:

1. Resultados y conclusiones del anterior informe.
2. Influencia del análisis en el diseño del prototipo.
3. Estrategias de competición.

Sección II – Projected Performance of Final House Design on an Annual Basis (Comportamiento energético de la casa, en ciclo anual). Las herramientas de simulación, según indicaba el documento, no solo deben ser usadas para tomar decisiones de diseño, sino para prever a largo tiempo, el comportamiento energético de la vivienda, es decir su comportamiento a lo largo de todo un año, y no solo durante la semana en la que se desarrollaría el concurso, calculando las cargas térmicas de la vivienda, el cálculo de iluminación natural y a partir de este,

---

<sup>111</sup> Para datos precisos de la simulación realizada ver Anexo 3: informes simulaciones energéticas. Casa Solar SD7. Simulation Input Report.

<sup>112</sup> *2007 Solar Decathlon Rules and Regulations*. 16 Febrero, 2007. El documento oficial 2007 *rules and regulation*, describe todo lo que cada equipo necesita saber para participar en el Sola Decathlon 2007, sobre las reglas, desarrollo y especificaciones de las distintas pruebas y documentos a entregar.

[http://www.solardecathlon.org/pdfs/07\\_techreport/07\\_rulesregs.pdf](http://www.solardecathlon.org/pdfs/07_techreport/07_rulesregs.pdf)

el artificial, analizando tanto la energía consumida, como la producida, mediante el uso de placas fotovoltaicas.

La misma casa debería simularse en varias ciudades estadounidenses, de climatología variada, habiendo elegido para su análisis las ciudades de Sterling (Washington-Dulles), la ciudad tomada como referencia para el cálculo energético en Washington D.C., en donde tiene lugar el desarrollo del concurso; Medford (Oregon) como clima frío y Phoenix (Arizona) como clima cálido, con el fin de observar el comportamiento energético en climas distintos.

Para la presente crítica, solo se tendrá en cuenta la realizada para la ciudad de Washington.

Se analizaron los siguientes puntos:

1. Estrategias pasivas.
2. Simulación energética del prototipo.
3. Iluminación.
4. Sistema solar térmico.
5. Sistema fotovoltaico.

El informe carece de conclusiones.

Descripción del edificio

Antes de empezar el análisis comentado, es necesaria una previa introducción sobre la casa, aunque en el informe no ha sido descrito.

La configuración general del prototipo presentado, consiste en un volumen prismático con orientación principal norte-sur (transversal), para aprovechar y controlar la radiación solar, con un cerramiento multicapa con niveles muy altos de aislamiento y con aperturas intencionadamente dimensionadas y situadas en función de su orientación.





Fig. 6-1 Fotografía del prototipo Casa Solar, Solar Decathlon 2007, tomada en el mal de Washington DC, durante el desarrollo del concurso. Orientación Sur. Fuente: archivo Solar Decathlon 2007



Fig. 6-2. Fotografía del prototipo Casa Solar, Solar Decathlon 2007, tomada en el mal de Washington DC, durante el desarrollo del concurso. Orientación Norte, fachada vegetal. Fuente: archivo Solar Decathlon 2007

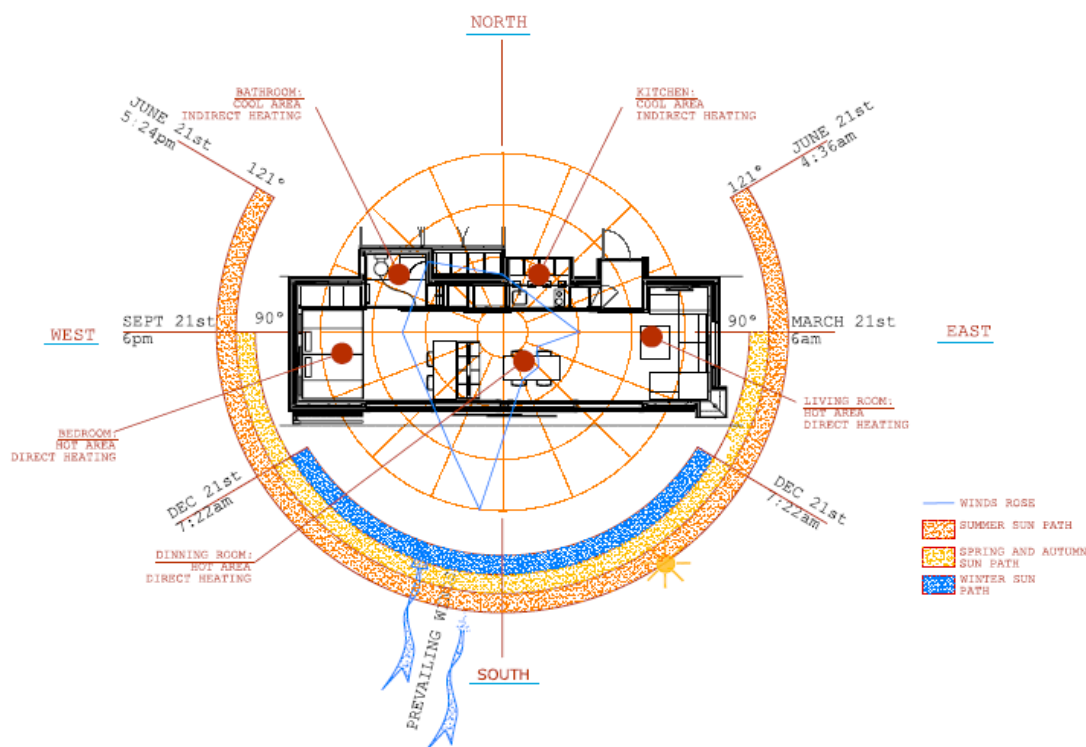


Fig. 6-3. Análisis bioclimático de la casa. Plano desarrollado para la entrega final del Concurso Solar Decathlon. Fuente: archivo Solar Decathlon 2007

El espacio interior de la vivienda fue concebido como un espacio fluido y versátil en el que las posibilidades de uso eran múltiples. Ésto se conseguía situando en la fachada Norte una banda que albergaba todos los espacios destinados a servicios, instalaciones, almacenaje y reciclaje. Esta banda de servicios se amplía en tres puntos mediante tres volúmenes que se adosan desde el exterior por la fachada Norte, un volumen de mayores dimensiones denominado "mochila tecnológica" que albergaba inodoro y ducha junto con todos los elementos de instalaciones que dotaban de autonomía a la casa (baterías, depósitos de agua, etc.).

Este espacio actuaba también como colchón térmico amortiguando el frío del Norte, creando un área de transición entre el exterior y la zona de estancia de la vivienda. Al exterior, dicha banda Norte se cerraba mediante una fachada vegetal<sup>113</sup>, y un sistema de cerramiento ligero multicapa basado en paneles de steel-frame<sup>114</sup>, que incorporan un alto nivel de aislamiento térmico y acústico. Al Sur, la casa se abría mediante un sistema de cerramiento de doble piel de vidrio con rejillas aireadoras

<sup>113</sup> El sistema de fachada vegetal, realizada por la casa Intemper, consiste en unos módulos formados por paneles de chapa galvanizada, con perforaciones circulares y con cerramiento posterior de poliestireno. Extruido, en los cuales se va introduciendo el tipo de vegetación deseada, en función de la orientación y de la climatología. Estos paneles se fijan a través de perfiles a un cerramiento ya existente, colocados a tope y por hiladas. En este caso se utilizó vegetación tipo Sedum.

<sup>114</sup> Los cerramientos multi-capas ligeros se caracterizan principalmente por su poco espesor y su poco peso, a la vez que están formados por una multiplicidad de capas especializadas, separadas o no por una cámara de aire, que en algunos casos puede estar trasdosada por un muro realizado con un material más pesado, permitiendo la alternancia de materiales de inercia térmica variable, mejorando de este modo su comportamiento térmico. La estructura utilizada fue Steel Frame que es una técnica constructiva general que utiliza un esqueleto de pilares a modo de montantes de chapa de acero laminados en frío y galvanizados.

superior e inferior, que precalentaba o enfriaba el aire de la casa según las condiciones exteriores climáticas, permitiendo controlar el flujo de aire que penetraba en el interior de la vivienda. Disponía además de un sistema de cortinas o estores, para evitar la pérdida de energía acumulada interiormente, por la noche.

### Metodología

El análisis energético se realizó con el programa Ecotect.

Los datos climáticos utilizados provienen de la base de datos del Energy Plus, usando como referencia la ciudad de Sterling (Virginia) tal y como indicaba el documento de Rules and Regulations<sup>115</sup> ya que el archivo climático de la ciudad de Washington-Dulles no estaba disponible.

Cerramiento y cubierta han sido analizados por el programa Therm 5.2, programa de simulación térmica de cerramiento, basado en elementos finitos, con el fin de determinar los puentes térmicos y corregirlos en su caso. Los cerramientos acristalados fueron analizados por el programa Window 5.2, para lograr un acristalamiento eficiente energéticamente.

### Modelización

La casa fue modelizada en un programa tipo "cad" (Autocad 2006), directamente en 3d, tal y como se comenta en punto 3, haciendo un volumen simplificado del edificio, para una mejor simulación. Para ello se eligió la modelización del edificio como una única zona térmica, incluyendo la zona del baño y la cocina y una zona no térmica, para la "mochila tecnológica".

Para una simulación más precisa, el edificio debería haberse simulado con tres zonas térmicas, (dormitorio-salón; baño y cocina), analizándolas separadamente, y viendo la influencia que los efectos de una excesiva humedad en la cocina podrían ocasionar sobre el resto de las zonas, debido a que éstas se encontraban separadas entre sí mediante un sistema de puertas correderas, descritas anteriormente.

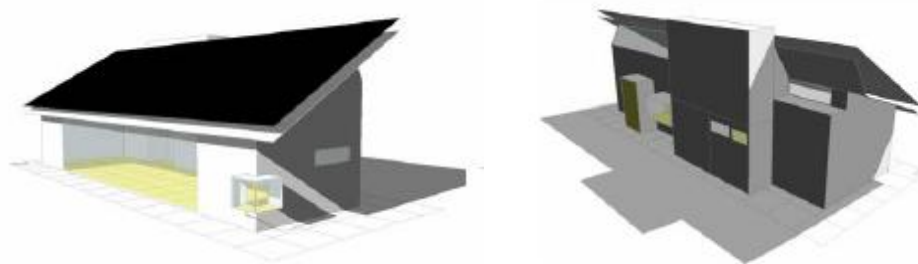


Fig. 6-4. Simulación del Edificio con el programa Ecotect. Vistas desde Sureste y Noroeste.  
Fuente: Archivo Solar Decathlon 07.

### Estrategias de Simulación

Con el fin de optimizar al máximo los recursos que nos ofrecía el programa, y poder simular la mayoría de las estrategias pasivas desarrolladas en el prototipo, se

<sup>115</sup> Rules and Regulation Solar Decathlon 2007. Capítulo *Economic Analysis Contest Activity Details* (pg. 57 del pdf).

hicieron dos simulaciones, una diurna sin protecciones, y otra nocturna con protecciones (entendiendo como protecciones las cortinas y estores de la fachada de doble piel orientada a sur y ventanas con el fin de evitar las pérdidas energéticas durante la noche), optimizando de este modo los resultados con el fin de obtener la menor carga térmica. Para ello se realizó una tabla en la que se variaba la tasa de infiltración de aire, ocupación, ganancias internas, ventilación natural mediante apertura y cierre de ventanas y horas de funcionamiento del sistema de climatización en función de las distintas épocas del año y horas del día, basándonos en los siguientes datos de partida:

- Sin/Con protecciones en las ventanas.
- Cubierta.  $U=0.479 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Según Therm.
- Cerramiento opaco:  $U=0.438 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Según el programa Therm.
- Forjado suelo:  $U= 0,245 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Según el programa Therm.
- Superficie acristalada: 3+3/12/5/190/5/12/3+3.  $U= 1.29 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Según el programa Window.
- Condiciones interiores de confort, impuestas por las reglas del concurso<sup>116</sup>, en donde la temperatura y humedad interior deberían estar dentro del siguiente rango: Temperatura interior entre 22-24°C y humedad entre 40 y 55%.
- En horas del "house tour" (enseñar y presentar la casa al público), no se tomarían mediciones. La casa está abierta, por no se hacía necesario el mantener las condiciones de confort impuestas por las Reglas.

### Resultados

Según este estudio el diseño de la casa contribuye a minimizar las pérdidas y ganancias energéticas, consiguiendo así que la cantidad de energía necesaria para obtener los niveles de confort adecuados sea la menor posible.

### Consideraciones

En este epígrafe se analizan las virtudes y defectos observados en la simulación energética realizada. Como se ha visto en el punto anterior, se realizó una simulación del prototipo Solar Decathlon presentado por la UPM para el Concurso. En general esta simulación estuvo muy bien enfocada desde el punto de vista de la modelización y su posterior simulación, partiendo ya de la complejidad que tenía en sí el edificio, debido a los sistemas constructivos pasivos (fachada de doble piel entre otros) que tenía. Para compensar la ausencia de las simulaciones que no pudieron ser realizadas, se hicieron unos estudios teóricos de la dirección de los flujos de aire que se producirían en la fachada, en las distintas estaciones, tal y como se explica posteriormente. El estudio con programas alternativos, como fueron el Therm para cerramientos opacos y el Window para cerramientos transparentes, completan el estudio, pudiéndose realizar una completa caracterización de dichos cerramientos, al carecer el programa Ecotect de estos

---

<sup>116</sup> Rules and Regulation. 2007 Solar Decathlon. Contest 5: Comfort Zone. Pg 1 y 2.

estudios. Se ha de resaltar la simulación lumínica natural realizada primero por Ecotect, y a partir de ella, estudio de iluminación artificial realizada por el programa Dialux bajo la dirección de expertos de la casa Philips, tomando como condicionantes los parámetros impuestos por las reglas del concurso<sup>117</sup>.

Sin embargo adolece de determinados errores, como se expondrá a continuación.

El informe no tiene conclusiones, aunque puntualmente la monitorización y toma de datos que se llevó a cabo en Washington, ha permitido conocer, no solo la respuesta de la Casa Solar en comparación con otras 19 casas con distintas soluciones constructivas en las mismas circunstancias y de características similares, sino si los datos previstos de la simulación se acercaban o diferían de la realidad.

Nuestro prototipo no pudo ser totalmente simulado por Ecotect o por los programas del Instituto LBNL, debido a su complejidad. Algunas de estas características fueron:

- La doble piel, con rejillas aireadoras exteriores e interiores superiores e inferiores, en el que se hubiera necesitado el uso de un programa de dinámica de fluidos (CFD), como puede ser el programa Fluent, de Ansys, debido a que se deberían simular dos fenómenos importantes:
  - o Conducción: el calor almacenado en la cámara pasaría por conducción a través del vidrio al interior de la vivienda. El vidrio bajo emisivo colocado en capa 2, evitaría las pérdidas hacia el exterior.
  - o Convección: abriendo las rejillas interiores, y manteniendo cerradas las exteriores, el aire calentado, es introducido en la vivienda por las rejillas superiores, debido a la presión excesiva creada en esa zona. Al mismo tiempo, el aire más frío de la vivienda, más denso y acumulado en la parte baja, tendería a entrar en la cámara por presión excesiva. Ese aire volvería a calentarse, para volver de nuevo ascender y completar el ciclo.

En vez de utilizar un programa de simulación, se realizó únicamente un primer estudio teórico del comportamiento de la ventilación, observando como la doble piel integrada en la vivienda ayudaría al precalentamiento o enfriamiento de la casa según las condiciones climáticas exteriores, tal y como puede observarse en el informe original adjuntado en el Anexo x. (Ver esquemas de flujos de ventilación del prototipo en las distintas estaciones).

- Fachada ventilada, del cerramiento opaco. Las circulaciones de aire producidas en la cámara de aire de la fachada ventilada reducen las pérdidas térmicas del edificio. Estas circulaciones de aire, deberían estudiarse mediante el programa Fluent (ANSYS).
- Sistema fotovoltaico. Aunque se ha simulado y calculado la energía producida total en el punto 5 del informe, no se ha calculado la cámara de aire resultante entre las placas fotovoltaicas y la cubierta, reduciendo la

---

<sup>117</sup> Cocina: 537 Lux. Comedor: 53 lux. Baño: 322 luxes. Según Rules and Regulation Solar Decathlon 2007. Pg. 82 Contest: Lighting, basadas en *9<sup>th</sup> Edition of the IESNA Lighting Handbook*

carga térmica por transmisión del módulo de la cubierta, y el funcionamiento de las placas fotovoltaicas.

- Fachada vegetal. El prototipo no ha tenido en cuenta la fachada vegetal en la simulación como control climático y regulador térmico en el edificio. Una fachada vegetal es un dispositivo de sombra eficaz que simultáneamente protege la fachada de una parte de la radiación solar y enfría la capa de aire que está en contacto con el muro mediante la evaporación del agua superficial de las hojas. La energía solar que interceptan las hojas se dispersa en vez de penetrar en el muro y calentarlo. La eficacia de la vegetación para controlar la insolación de las fachadas está en función de su frondosidad y cobertura, que proporcionan mayor o menor protección a la radiación solar, y mayor o menor superficie evaporativa. La temperatura superficial de los muros protegidos del sol por la vegetación se reduce, y por consiguiente, hacia el interior se transmite una menor cantidad de calor. Se podría haber simulado por ejemplo usando el programa de ordenador Antesol-06, Análisis Térmico en Cerramientos Soleados<sup>118</sup> o bien el DesignBuilder (Energy Plus). El Ecotect no permite su simulación<sup>119</sup>.

Todas estas características y la realización de estas simulaciones darían un ajuste a la simulación energética realizada. Por esta razón, seguramente el ahorro de energía obtenido será mayor que los mostrados por los resultados de la simulación.

#### Cálculos sencillos:

Para el cálculo de la carga térmica de la vivienda, aplicaremos lo prescrito en el RITE, para lo que calcularemos primeramente el calor transmitido por todos los paramentos exteriores de la vivienda. Previamente a esto, calcularemos, el coeficiente de transmisión térmica de las distintas fachadas que el suelo y el techo que la constituyen.

Calcularemos la carga de fría (frigorías) necesaria para climatizar el edificio en verano.

El calor transmitido por el paramento, se calculará por la siguiente expresión:

$$Q = K \times S \times (TE - TI)$$

Siendo:

Q = el calor transmitido por el cerramiento en estudio, en Kcal/h

K = coeficiente global de transmisión térmica en dicho paramento en Kcal/hm<sup>2</sup>°C

TI = temperatura interior.

TE =temperatura exterior.

S = Superficie en m<sup>2</sup>

---

<sup>118</sup> Desarrollado por el Dr. Arquitecto Manuel Martín Monroy (Monroy, M., 1999).

<sup>119</sup> (Britto Correa, 2001)

Para el cálculo del caudal de aire por ventilación, tomaremos lo indicado el CTE- HS3, tabla 2.1, de caudales de ventilación mínimos para los locales de una vivienda. Estimamos 10 l/sm<sup>2</sup> en sala de estar y comedor (para dos personas).

Los incrementos por orientación en calor, por estar la vivienda orientada a sur, se consideran un 0%.

Tabla 6-I. Tabla de cálculo carga térmica

	<b>K (Kcal/hm<sup>2</sup>°C)</b>	<b>S (m<sup>2</sup>)</b>	<b>T<sub>E</sub>-T<sub>I</sub> (°C)</b>	<b>Q (Kcal/h)</b>
<b>Cerramiento vidrio</b>	1.57	50,22	8	630.7
<b>Cerramiento opaco</b>	0.24	6.71	8	12.8
<b>Suelo</b>	0.57	44.4	8	202.4
<b>Techo</b>	0.57	44.4	8	202.4
<b>TOTAL</b>				<b>1048.3</b>

En donde:

$$T_i = 24^\circ\text{C}$$

$$T_e = 32^\circ\text{C}$$

Según condiciones (NFRC 100-2001 verano).

$$44.4 \text{ m}^2 \times 10 \text{ l/s m}^2 = 444 \text{ l/s} = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$0.4 \text{ m}^3/\text{s} \times 3600 \text{ s/h} = 1440 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q = 0.24 \text{ Kcal/m}^3\text{°C} \times V \times (T_E - T_I)$$

$$1440 \text{ m}^3/\text{h} \times 0.24 \text{ Kcal/hm}^2\text{°C} \times 8 \text{ °C} = 2764.8 \text{ kcal/h} +$$

$$\underline{1048.3 \text{ kcal/h}}$$

$$3813.1 \text{ kcal/h}$$

$$3813.1/44.4 \text{ m}^2 =$$

$$\underline{85.8 \text{ f/hm}^2}$$

#### ELECCIÓN DEL CLIMATIZADOR

$$44.4 \text{ m}^2 \times 85.8 \text{ f/h m}^2 = 3809.52 \text{ f/h}$$

$$3809.52 \text{ f/h} \times 1,16 \text{ w/f} = 4419 \text{ W} = 4.4 \text{ KW}$$

Según los cálculos realizados, obtenemos unas 85.8 f/hm<sup>2</sup>, que comparándolos con los obtenidos en la simulación (ver pdf en el anexo), 2155Kw/h=55.91 f/hm<sup>2</sup>, (necesitando un modelo de aire acondicionado de 2.8 kW de potencia nominal, obteniendo por tanto con la simulación un resultado en porcentaje, un 34.8% mejor que el cálculo realizado, debido a las estrategias de ventilación realizadas según las distintas épocas del año. Al final, en la realidad, se sobredimensionó para elegir finalmente un modelo de aire acondicionado aire-aire modelo Carrier 38VYM con dos unidades interiores, cuya capacidad nominal era 5.08Kw (en frío), (ver anexo x, donde se adjunta plano de climatización y hoja técnica). Este sobredimensionamiento fue debido a la variabilidad del mes de Octubre en Washington.

Según M. Izquierdo La demanda media de refrigeración de una vivienda de unos 80m<sup>2</sup> construidos es de 5 kW.

*"En este trabajo, el cálculo de la carga térmica se ha realizado considerando los datos de INDEL, en periodos horarios, diarios, mensuales, por estaciones y periodos anuales. Para el cálculo de la carga térmica se han utilizado las condiciones reales externas (de la base de datos del IETCC) y las condiciones interiores establecidas en el RITE (1998). (...) La carga térmica de refrigeración se ha obtenido sumando la carga de transmisión, renovación e infiltración, más las cargas interiores y ganancias de energía solar."*<sup>120</sup>.

Nuestra vivienda (de 70m<sup>2</sup> construidos, equivalente a la expuesta), se comporta un 44% mejor que una vivienda normal.

### Conclusiones de la simulación

Como conclusiones finales aplicables a la presente investigación, se exponen las siguientes:

- La complejidad del modelo que hace difícil su modelización (el modelo tuvo que ser simplificado) y su posterior simulación, es un argumento a favor de la simplicidad de modelo de ensayo.
- Esa complejidad hace difícil la verificación de las simulación incluso después de tener los resultados reales. Eso lleva a una incertidumbre sobre la precisión del programa Ecotect, por lo que se llevará a cabo una verificación de su precisión con modelos sencillos.
- El análisis y caracterización de los cerramientos tanto opacos como transparentes, ayudan a la simulación y posterior introducción de datos en el programa Ecotect, que adolece en esos sentidos. Eso nos permite, una caracterización muy completa de los cerramientos y su posterior estudio, por ejemplo en el caso de la existencia de puentes térmicos. Se recomienda por tanto, y se ha tenido en cuenta para posteriores simulaciones, su estudio pormenorizado y detallado con estos programas.

---

<sup>120</sup> (Izquierdo Millán, Gavira Galocha, Alfaro, & Lecuona Neumann, Agosto 2005)



### 6.5.2. EDIFICIO “ALTRA ECONOMIA” Y “ACCADEMIA DI BELLE ARTI”

La realización de la siguiente crítica de análisis energético, forma parte de una serie de simulaciones de edificios ya construidos y/o en proceso de construcción, diseñados y construidos por el Profesor Luciano Cupelloni<sup>121</sup>, a partir de la estancia de investigación desarrollada en la Università “La Sapienza” di Roma, en el departamento Industrial Design Tecnologia dell’Architettura e Cultura dell’Ambiente ITACA. Este trabajo, propuesto por el mismo profesor Luciano Cupelloni, y bajo la tutoría del mismo y de la profesora M<sup>a</sup> Caterina Redini<sup>122</sup>, ambos responsables de la estancia de la doctoranda, ha sido completado gracias al material técnico cedido por el estudio de arquitectura LCA Luciano Cupelloni Architettura<sup>123</sup> (plantas, alzados y memorias generales y estudio bioclimático realizado por el estudio *Ricerca e Progetto Galassi, Mingozzi e associati*.

Los edificios, tienen unas condiciones geométricas, de orientación y sistemas constructivos idóneos para la realización de este estudio y una posterior comparación entre ambos. Se trata de edificios, con una gran superficie acristalada, en el que se puede observar y calcular fácilmente la influencia de la elección de un tipo de vidrio u otro, como posteriormente analizaremos.

Se va a realizar una crítica conjunta de la simulación energética realizada de ambos edificios, *Altra Economia* y *Accademia delle Belle Arti* sitios en el Mattatoio di Testaccio (Roma), adjuntando los informes originales (en italiano) en el Anexo 3: Metodología de simulación. Informes simulaciones energéticas.

#### Objetivos

Este estudio plantea un análisis de la influencia de fachadas de vidrios en edificios, mediante su estudio energético por programas de simulación por ordenador, habiéndose elegido para ello, el Ecotect. Se ha escogido este programa, por haberse considerado uno de los más adecuados para este estudio, y por estar enseñándose a los alumnos en ese momento en la Università di Roma “La Sapienza”.

Uno de los objetivos, tal y como llegó a hablarse con el arquitecto Luciano Cupelloni, pero aún sin ningún acuerdo, era la comprobación de los datos obtenidos con la simulación con una futura monitorización de ambos edificios, con el fin de observar el comportamiento energético real.

Se hará una crítica conjunta de ambos edificio, por tener objetivos y modo de realización comunes.

---

<sup>121</sup> Luciano Cupelloni, arquitecto, profesor catedrático de Tecnologia dell’Architettura en la Facoltà di Architettura “Ludovico Quaroni” de la Università di Roma “La Sapienza”. Coordinador de la sección “Tecnologie ecosostenibili dell’architettura” (TECA) del Departameto ITACA. Miembro del Colegio de docenti del Dottorato di Ricerca en “Progettazione Ambientale”.

<sup>122</sup> M<sup>a</sup> Caterina Redini, Profesor titular de Disegno Industriale en la Facoltà di Architettura “Ludovico Quaroni” de la Università di Roma “La Sapienza”. Imparte docencia en el Atelier di Allestimento en la diplomatura de Disegno Industriale. Coordinador científico del programa de Med Campus Unimed A139 (CEE) (1993-1995), y miembro del Comité científico STOA. Ha dirigido numerosas tesis sobre vidrios y su aplicación en la arquitectura.

<sup>123</sup> Página web del estudio de Luciano Cupelloni: <http://www.lc-architettura.com/>

### Descripción del lugar.

El edificio "Altra Economia" pertenece al complejo del *Mattatoio y Campo Boario*, situado en el barrio de *Testaccio*, que fue realizado entre el 1888 y el 1891, bajo proyecto de Gioacchino Ersoch, arquitecto emérito del Ayuntamiento de Roma. Se encuentra entre la muralla Aureliana, entre el monte dei Cocci, el antiguo mons Testaceum y el río Tevere.

Dicho complejo está constituido por dos partes, el propio *Mattatoio* (Matadero), y el comúnmente llamado *Mercato del Bestiame* (Mercado de ganado bovino), que constan de una superficie de 105.000 m<sup>2</sup> de los cuales, 43000 m<sup>2</sup> están cubiertos. El complejo fue abandonado en el 1975. Años más tarde, en el 1988, debido a la singularidad del conjunto, pasa a formar parte de la *Soprintendenza per i Beni Architettonici e Ambientali di Roma*, constituyendo lo que se llama actualmente "Citá delle Arti".

El proyecto que refleja la transición de lo clásico a lo moderno, se caracteriza por grandes pabellones y ligeros voladizos que representan no solo los tradicionales muros de ladrillo, travertino y elementos estucados, sino también las estructuras de fundición en un refinado equilibrio entre la monumentalidad y la racionalidad industrial.<sup>124</sup>

### Descripción del edificio "Altra Economia".

Diversos edificios abandonados que formaban parte del antiguo *Mercato del Bestiame*, pasan a formar parte de la rehabilitación del conjunto pasándose a denominar: espacios para el edificio Altra Economia.

EL Edificio Altra Economia<sup>125</sup>, se presenta compuesto por 4 módulos:

- Modulo 1 – Dirección y servicios – 480 m<sup>2</sup>
- Modulo 2 -Mercado de agricultura biológica y Bio-Bar–605 m<sup>2</sup>
- Modulo 3 – Promoción y Bio-Restaurante – 700 m<sup>2</sup>
- Modulo 4 – Comercio solidario y producciones eco-compatibles –600 m<sup>2</sup>

Para la realización del presente análisis se ha individualizado uno de los módulos (módulo 3), constituido por Promoción y Bio-Restaurante. Tras el estudio del

---

<sup>124</sup> [http://www.comune.roma.it/was/wps/portal!/ut/p/ s.7 0 A/7 0 21L?menuPage=/Area di navigazione/Sezioni del portale/Dipartimenti e altri uffici/Dipartimento XIX/Chi siamo/V U-9-O-9-Autopromozione Sociale/Campo Boario/Il progetto di restauo del Campo Boario/&flag Sub=](http://www.comune.roma.it/was/wps/portal!/ut/p/ s.7 0 A/7 0 21L?menuPage=/Area_di_navigazione/Sezioni_del_portale/Dipartimenti_e_altri_uffici/Dipartimento_XIX/Chi_siamo/V_U-9-O-9-Autopromozione_Sociale/Campo_Boario/Il_progetto_di_restauo_del_Campo_Boario/&flag_Sub=)

<sup>125</sup> Ha obtenido los siguientes premios: Premio Europa Nostra Award 2009 en la categoría de conservación y restauración; mención especial del premio GUBBIO ANCSA (2009); Mención especial al premio internacional Arquitectura Sostenible Fassa Bortolo (2009); Primer premio por intervención en recalificación edificatoria en el Premio Romarchitettura (2008); Tercer Premio Iqu Innovazione e Qualita' Urbana para obras realizadas (2007); Mención en el Premio internacional de "Arquitectura Innovativa." (2006); cuarto clasificado en Europa en Premio Holcim (2005). Fuente: [www.lc-architettura.com](http://www.lc-architettura.com)

edificio se concluye que este módulo es el más apropiado para el desarrollo de la simulación energética, por ser el módulo con características más similares en volumen y dimensiones al "Edificio Accademia di Belle Arti" y así poder realizar a posteriori un estudio comparativo entre ambos.

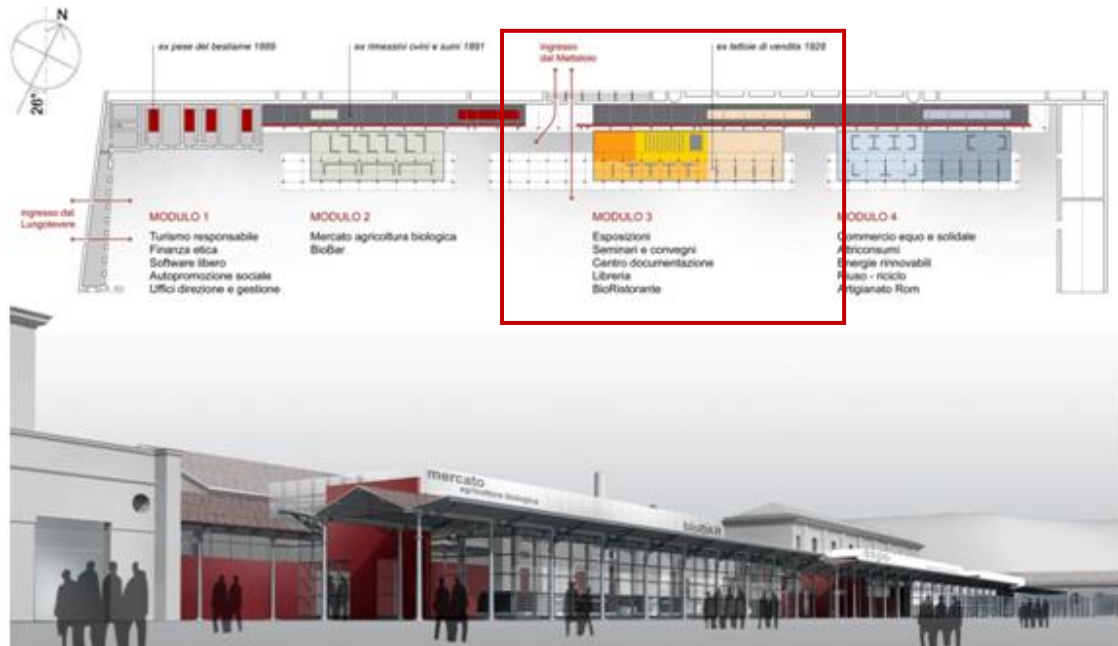


Fig. 6-5. Planta del edificio "Altra Economia" e infografía. Fuente: estudio LCA.

Se trata de un edificio longitudinal de 38 metros de largo, y 16m de ancho, y con una gran fachada acristalada orientada a 26° suroeste realizada con carpintería aluminio y doble vidrio laminado bajo emisivo y reflectante, con cámara de argón. Dispone además de continuas lamas de acero, en la parte inferior, y ventanas con posibilidad de apertura motorizada en la superior, con el fin de crear una ventilación cruzada con los lucernarios.

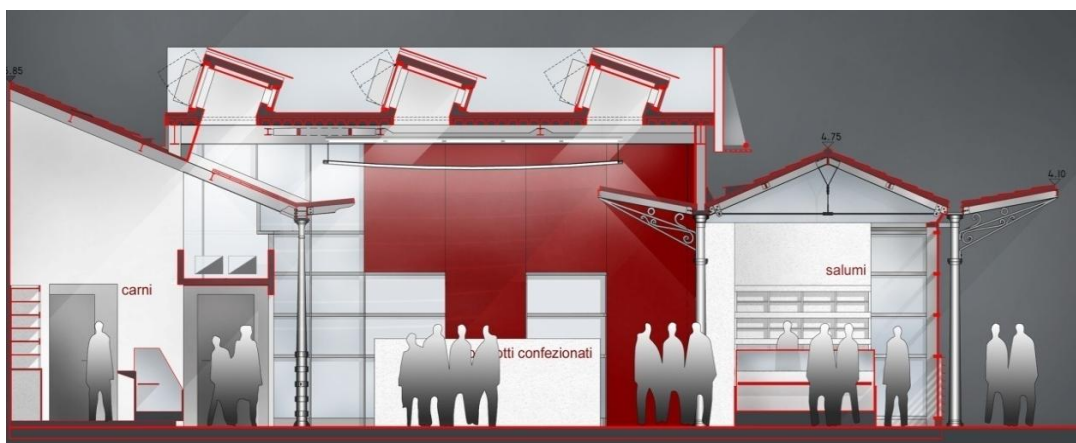


Fig. 6-6. Sección transversal del edificio "Altra Economía" mediante infografía. Fuente: estudio LCA.

Se ha mantenido en todo momento, la cubierta existente en forma de voladizo, con 66m de largo, que impide la entrada del sol en una gran parte en los meses de verano, tal y como se observa en la anterior imagen.

### Descripción del edificio "Accademia di Belle Arti"

El edificio de la academia de las Bellas Artes, está compuesto por dos grandes pabellones de hierro fundido ubicados en el centro del Campo Boario.

Se tratan de los dos únicos edificios supervivientes de una serie de cinco, totalmente idénticos, que constituían en su origen los pabellones para la exposición del ganado bovino, en un grande y único ambiente cubierto por un tejado a cuatro aguas constituido por cerchas de tipo Polonceau sencillas, constituidas por tirantes en I (doble T) y correas en hierro, sostenidas a su vez por pilares de hierro fundido colocadas en el perímetro del pabellón. El exterior del perímetro lo constituye una balaustrada en hierro fundido definiendo un espacio único y flexible, particularmente indicado para su restauración y utilización para escuelas de pintura, escultura, decoración y escenografía de la Academia de Bellas Artes.

Cada pabellón está formado por tres grandes espacios, por un total de 6 aulas, de 200 y 300 m<sup>2</sup>, resultando un espacio flexible, cerrado por un cinturón perimetral transparente, utilizando el mismo tipo de vidrio que se ha usado para el edificio de la Altra Economia. El interior, está organizado a partir de originarios pasajes convertidos en una especie de largos atrios abiertos, que conectan con las aulas.

Para su análisis se ha escogido uno de los dos pabellones.

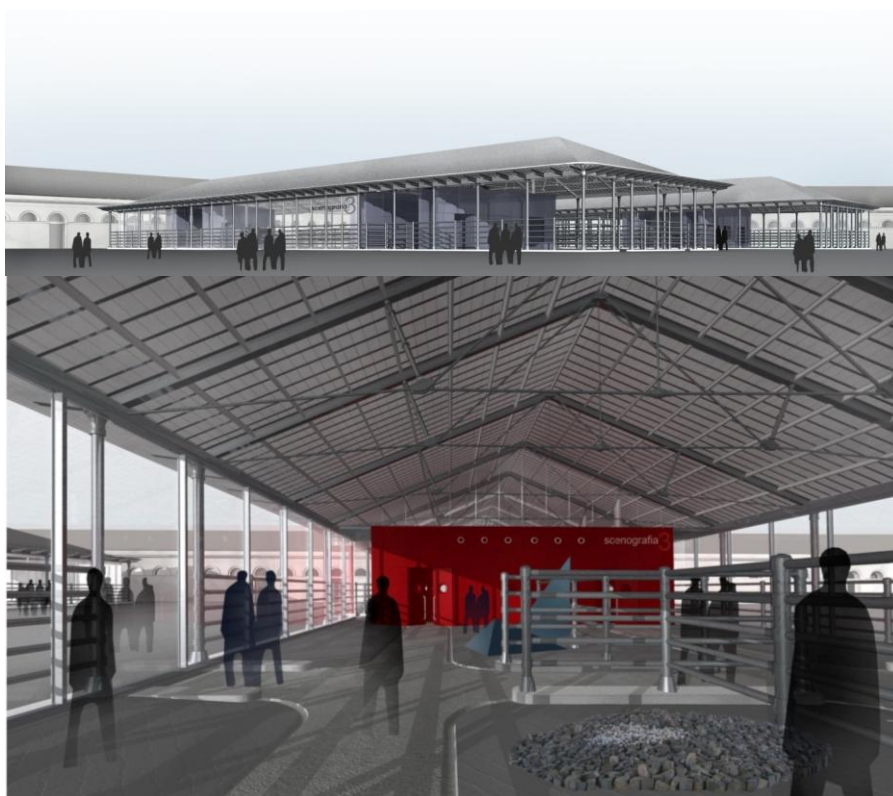


Fig. 6-7. Infografías del exterior y del interior del edificio de la Accademia di Belle Arti.  
Fuente: estudio LCA.

Dicho edificio, está orientado a lo largo del eje longitudinal Este-Oeste, a 26° de orientación Sur.

Metodología:

El análisis energético de ambos edificios se ha realizado con el programa Ecotect.

Los datos climáticos utilizados provienen de la base de datos del programa Energy Plus, habiéndose utilizado el archivo de Roma (Italia), disponible en la página web: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm), realizando la conversión correspondiente a la extensión que necesitamos. (Ver punto 3).

Los cerramientos opacos y acristalados han sido analizados por el programa Therm 5.2 y Window 5.2. Aunque dichos análisis no se recogen en el informe, adjuntados en el Anexo x, los datos obtenidos (factor U de los cerramientos) se compararon con los utilizados en el proyecto de ejecución cedido por Luciano Cupelloni, observándose que coincidían.

Brevemente, trataremos de explicar el número de simulaciones realizadas y las hipótesis de partida de cada uno de los edificios, con el fin de justificar la elección de dichas hipótesis de cara a los resultados que se esperan obtener.

- Altra Economía. Se han realizado dos simulaciones, con el fin de observar la influencia de las medidas de protección solar en el edificio, entendiendo por ello las lamas continuas de acero colocadas a lo largo de toda la fachada acristalada en orientación sur, y del voladizo de la cubierta rehabilitado. Una tercera simulación realizada, tiene por objeto estimar la influencia que había tenido en el edificio la elección de un vidrio bajo emisivo, en su comparación con un doble acristalamiento sencillo, y eliminando todas las protecciones solares.
- Accademia delle Belle Arti. Se han realizado dos simulaciones, primeramente con el fin de observar la influencia de la estrategia de la ventilación natural en el edificio, proponiendo un valor 1renov/h en verano y 0.2 en invierno. Por último, para realizar la comparación entre ambos edificios, se ha simulado el edificio con una protección solar, a modo de cortinas, en la superficie acristalada, para reducir las pérdidas nocturnas. Esto se ha podido simular cambiando el color del vidrio (más oscuro y disminuyendo la transparencia) y disminuyendo su factor U. Al constar el edificio de dos zonas, cada zona debe ser simulada por separado, para obtener unos resultados más precisos.
- No podemos olvidar la simulación de sombras y de iluminación natural realizada sobre las fachadas de ambos edificios expuestas a la radiación solar, la cual nos releva datos importantes de su comportamiento.

Modelización:

Ambos edificios se han modelizado a partir del programa de dibujo 3d Studio Max 2010, (tal y como se especifica en el punto 3.1).

Para una correcta modelización de los edificios, se han creado las diferentes zonas térmicas de las que se componen los edificios en función de las distintas actividades y la temperatura deseada en su interior. Tras el análisis de los edificios, se concluye

que el número de zonas para el de Altra Economía es de una, y para el de la Accademia delle Belle Arti, de dos.

### Estrategias pasivas

Con el fin de hacer una simulación energética lo más cercana al funcionamiento real de los edificios, se han seguido una serie de estrategias bioclimáticas pasivas, actuando principalmente en el uso de la ventilación natural, con el fin de reducir la carga térmica en las distintas épocas del año.

- Ventilación cruzada. Control de las aperturas de las ventanas Este y Oeste, en verano en horas nocturnas, y en invierno en horas diurnas, con el fin de apagar la calefacción cuando la temperatura y humedad programadas alcancen de 18 a 24 °C, y 50% de humedad.
- Control de tasa de infiltración de aire con el exterior, proponiendo un valor 1renov/h en verano y 0.2 en invierno.
- Sistema de climatización con free-cooling (uso de ventilación natural), de modo que el sistema de climatización se apague cuando se alcancen las condiciones de confort.

Datos de partida del edificio Altra Economía.

- Cerramiento opaco: Factor U: 0.150 W/m<sup>2</sup>K.
- Cerramiento transparente factor U: 1.110 W/m<sup>2</sup>K
- Tabiquería interior: factor U: 0.110 W/m<sup>2</sup>K.
- Cubierta factor U: 0.590 W/m<sup>2</sup>K.

Datos de partida del edificio Accademia delle belle arti.

- Cerramiento opaco: factor U: 0.150 W/m<sup>2</sup>K.
- Cerramiento transparente: factor U: 1.110 W/m<sup>2</sup>K
- Tabiquería interior: factor U: 0.110 W/m<sup>2</sup>K.
- Cubierta: factor U: 0.590 W/m<sup>2</sup>K.

### Resultados "Edificio Altra Economía"

El edificio Altra Economía, tal y como se expone en la figura 3 del documento adjunto en el anexo 3, se ha observado un 7% de ahorro en aire acondicionado y un 8% en calefacción en invierno, al colocar las medidas de protección solar en el edificio.

Se obtuvo un 55% de ahorro en calefacción y un 15% en aire acondicionado, al comparar la elección del vidrio bajo emisivo en su comparación con un doble acristalamiento sencillo, y eliminando todas las protecciones solares.

Estos resultados nos indican, que el edificio, según las simulaciones realizadas tiene un buen comportamiento tanto en invierno como en verano, aunque se deberían

añadir protecciones a modo de estores o cortinas interiores en verano para evitar las pérdidas, y la posibilidad de poder orientar las lamas de acero, que protegen al edificio de la radiación directa del sol, y distribuyen la iluminación difusa en el espacio, tal y como se observa en la simulación de la iluminación natural realizada sobre la fachada sur. (Según simulación de radiación solar en pg. 18, el ahorro solar mayor se obtiene a la salida y a la puesta de sol, con un 11-12%, reduciéndose en las centrales del día. Se concluye también que el edificio no necesita iluminación artificial entre las 9:00h y las 17:00h, según simulación de iluminación natural. (Ver pag. 17 del informe).

#### Conclusiones de la simulación "Edificio Altra Economía"

Se ha concluido en el informe, aunque de un modo indirecto, por estar repartidas las conclusiones en los diversos capítulos de los que consta el informe, que con el uso de un vidrio bajo emisivo hay un 5.5% menos de ganancia solar en su totalidad, pero un 4.7% menos en pérdidas por el cerramiento, obteniendo de este modo un ahorro de un 55% en calefacción y un 15% en aire acondicionado, según tabla de conclusiones en página 23 del informe.

Observando el informe y las tablas de la figura 4 del informe adjunto en el Anexo 3 se concluye que con la estrategia de ventilación pasiva se ha logrado un ahorro de más del 50% en aire acondicionado.

#### Resultados "Edificio Accademia di Belle Arti".

Aprovechando las estrategias de ventilación del edificio por disponer de ventanas con apertura monitorizada, tanto en las fachadas orientadas a Este y Oeste, se observa que el edificio tiene un ahorro de más del 50% de aire acondicionado en los meses mayo, junio, septiembre y octubre. En los meses de julio y agosto, el ahorro es de un 20%. No hay cambios para la calefacción en invierno. Esto nos indica, que el edificio o más bien sus ocupantes, deberían aprovechar al máximo esta estrategia.

Según la simulación de iluminación natural, se obtiene que en las zonas técnicas y baños, será necesario el uso de iluminación eléctrica y puntual en momentos precisos. Para el resto, la iluminación media es de 450-700 lux. Solamente será necesaria un mínimo aporte de iluminación artificial para proveer 150 luxes en algunas áreas específicas del edificio central, para conseguir el mínimo previsto en las aulas, según requerimientos del proyecto.

#### Conclusiones "Edificio Accademia di Belle Arti".

Haciendo una síntesis de los diagramas propuestos del comportamiento energético en los periodos estacionales en página 28 del informe, el cual nos indica la magnitud en porcentual de las diferentes variables que muestra una zona térmica en un periodo determinado, se hace notar como el edificio sufre particularmente de pérdidas por cargas invernales debidas a conducción, (hasta un 91.5%) y una excesiva ganancia solar en verano (un 48%), debido principalmente a la alta superficie acristalada. Se compensaría con protecciones solares orientables según la dirección de la radiación solar y con cortinas o estores interiores en verano.

De la simulación de iluminación concluimos diciendo que la necesidad de iluminación artificial es de un 20-30% en meses invernales y de un 5-10% según zonas, en periodo estivos.

Comparación edificios “Altra Economía” y Accademia di Belle Arti”

En el informe se ha realizado una comparación entre los edificios de *Altra Economía* y *Accademia delle Belle Arti*, al tener ambos edificios un volumen interior 3500m<sup>3</sup> (±20%) y una superficie similares, de unos 590m<sup>2</sup> (±3.5%), tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 6-II. Comparación de las cargas mensuales de frío y de calor de los edificios Altra Economía y Accademia Belle Arti.

MONTHLY LOADS							
Altra Economía				Accademia Belle Arti			
MONTH	HEATING (kWh)	COOLING (kWh)	TOTAL (kWh)	MONTH	HEATING (kWh)	COOLING (kWh)	TOTAL (kWh)
Jan	1109,7	0	1321,3	Jan	1213,335	0	1213,335
Feb	835,2	0	984,8	Feb	900,462	0	900,462
Mar	509,4	0	576,4	Mar	820,408	0	820,408
Apr	237,2	0	246,3	Apr	434,624	0	434,624
May	101,0	38,0=0	217,3	May	250,693	305,922	556,615
Jun	0	2436,4	2633,6	Jun	0	3995,375	3995,375
Jul	0	6656,8	6505,0	Jul	0	9372,454	9372,454
Aug	0	6119,0	6054,9	Aug	0	5297,974	5297,974
Sep	0	2775,8	3000,9	Sep	0	4737,276	4737,276
Oct	85,8	41,6=0	170,1	Oct	138,729	37,809=0	176,538
Nov	298,6	0	357,2	Nov	463,880	18,458=0	482,338
Dec	1436,1	0	1537,4	Dec	2320,176	0	2320,176
<b>TOTAL</b>	<b>4613,3</b>	<b>18067,8</b>	<b>23605,9</b>	<b>TOTAL</b>	<b>6542,307</b>	<b>23765,270</b>	<b>30307576</b>
<b>Per m<sup>2</sup></b>	<b>8</b>	<b>29</b>	<b>38</b>	<b>Per m<sup>2</sup></b>	<b>11</b>	<b>41</b>	<b>52</b>
<b>m<sup>2</sup> totali</b>	<b>597,8 m<sup>2</sup></b>			<b>m<sup>2</sup> totali</b>	<b>576,4 m<sup>2</sup></b>		
<b>Volume:</b>	<b>2836,6 m<sup>3</sup></b>			<b>Volume:</b>	<b>3513,3 m<sup>3</sup></b>		

Se obtiene lógicamente, que el edificio de la Altra Economía, al tener un 50% menos de superficie acristalada y un 20% menos de volumen, tiene una diferencia de consumo a su favor con respecto al otro de un 27% en calefacción y un 30% en aire acondicionado. Una posible solución, sería la colocación de protecciones solares a modo de estores o cortinas interiores en la fachada para evitar las pérdidas nocturnas, obteniendo de este modo un 32.4% de ahorro en aire acondicionado.

Dicho informe concluye que el edificio de Accademia delle Belle Arti es un 3% mejor en verano, y un 50% en invierno, resultando tener un mejor comportamiento térmico, obviando el funcionamiento del sistema de climatización, aunque la carga térmica era mayor. Esto es debido principalmente a la ocupación, ganancias internas y a la diferencia de superficies acristaladas usadas, teniendo ambos la misma superficie.



Por lo tanto, el uso de grandes superficies acristaladas, puede reducir las cargas térmicas finales, gracias a las ganancias solares. Para completar el análisis térmico de ambos edificios, se ha realizado un análisis lumínico con el programa Radiance, que completan la simulación realizada.

### 6.5.3. APORTACIÓN DE ESTAS SIMULACIONES

En este punto se van a valorar las aportaciones que la ejecución de estas simulaciones tiene para el desarrollo de esta tesis. Para ello se van a analizar las virtudes y defectos observados en la ejecución de ambas simulaciones energéticas realizadas de ambos edificios. Como hemos visto anteriormente, se tratan de dos simulaciones realizadas simultáneamente en edificios reales, uno en proceso de construcción y otro ya terminado, por lo que el problema principal yace en la falta de influencia de la simulación energética en el proceso constructivo y el de proyecto para mejorarlo. La idea base es que las simulaciones energéticas deben hacerse para que ayuden y colaboren no solo en el proceso edificatorio, sino también en el diseño del edificio.

Se puede decir que estas simulaciones han estado muy bien enfocadas desde el punto de vista de la modelización del edificio y su posterior simulación, partiendo de la base de la complejidad que tenían en sí los edificios (diseño, estrategias de ventilación, control del soleamiento e iluminación en las distintas épocas del año), aprovechando al máximo las posibilidades de simulación que el programa Ecotect ofrece en estos términos, jugando con las distintas tablas de infiltración de aire, apertura o cierre de ventanas, uso o no de la climatización etc. y el uso del programa Radiance que funcionando a partir del programa Ecotect, permitiendo la exportación-importación de datos entre ambos programas, nos permite un estudio pormenorizado y más preciso del análisis lumínico, tal y como se observa en el informe del edificio "*Accademia di Belle Arti*".

El estudio con programas complementarios, como fueron el Therm para cerramientos opacos y el Window para cerramientos transparentes, tal y como se hizo con el análisis de la casa solar participante en el concurso Solar Decathlon, aunque no figuran en el informe (pero deberían haber sido incorporados al mismo), hubieran complementado el estudio, pudiéndose dar una completa caracterización y estudio de dichos cerramientos. Sin embargo adolece de determinados errores, como se expondrá a continuación.

Para una fácil modelización y posterior simulación, el modelo tuvo que ser simplificado con respecto a la realidad. Para ello, como se ha comentado anteriormente, se ha elegido uno solo de los módulos o edificios, que más lo representaban. La previa modelización en un programa de diseño en 3d (3d Studio Max), dan bastantes problemas a la hora de la importación, quedando las superficies abiertas, y dando por tanto errores de volúmenes. Estos problemas se resolvieron redibujando las superficies erróneas o abiertas en el programa Ecotect. Para sucesivos análisis, se deberá corregir este problema, corrigiendo el problema de la conversión o paso de datos de la extensión de 3ds a Ecotect, o dibujando directamente en Ecotect, aunque esto dificulta el modelizado en edificios complejos. En la actualidad se está estudiando esta conversión, con el ingeniero Ivan Paduano.

Aunque los resultados obtenidos son coherentes con la experiencia adquirida hasta el momento con el uso de estos programas, se debería haber realizado una simulación más profunda de la ventilación natural, dada la importancia que adquiere en estos edificios, por ejemplo con el programa Fluent (Ansys).

Una futura monitorización, tal y como se ha acordado verbalmente con el profesor Cupelloni, o incluso la realización de esta simulación con otros programas, como puede ser el DesignBuilder que funciona bajo el motor de cálculo del Energy Plus, permitiría la comparación de estas simulaciones con su comportamiento energético en la realidad.

## 6.6. CARACTERIZACIÓN Y MODELIZACIÓN DE LOS ENSAYOS FÍSICOS.

### 6.6.1. MODELIZACIÓN DEL ENSAYO.

Como ya se ha dicho, para optimizar los resultados de la simulación se va a construir un modelo similar al que se utilizará en los ensayos físicos, consistente esencialmente en la realización de dos cámaras de ensayo gemelas de 60x60x60cm. bien aisladas y abiertas por una de sus caras para admitir diferentes tipos de vidrio. El hecho de utilizar dos cámaras gemelas permite comparar los resultados obtenidos con un determinado tipo de vidrio con otro designado como patrón. (Ver capítulo 7: Metodología experimental: ensayos físicos. Punto 7.2. método de ensayo).

Generalmente, la modelización se suele hacer con un sistema de dibujo tipo "cad" en 3D, y su posterior exportación en extensión 3ds, según se ha explicado en el punto 3. En modelos sencillos, como es el caso que nos ocupa, se puede modelizar directamente en Ecotect.

El resultado final de la modelización, previo a la simulación térmica e introducción de materiales es la figura 6-8 adjunta.

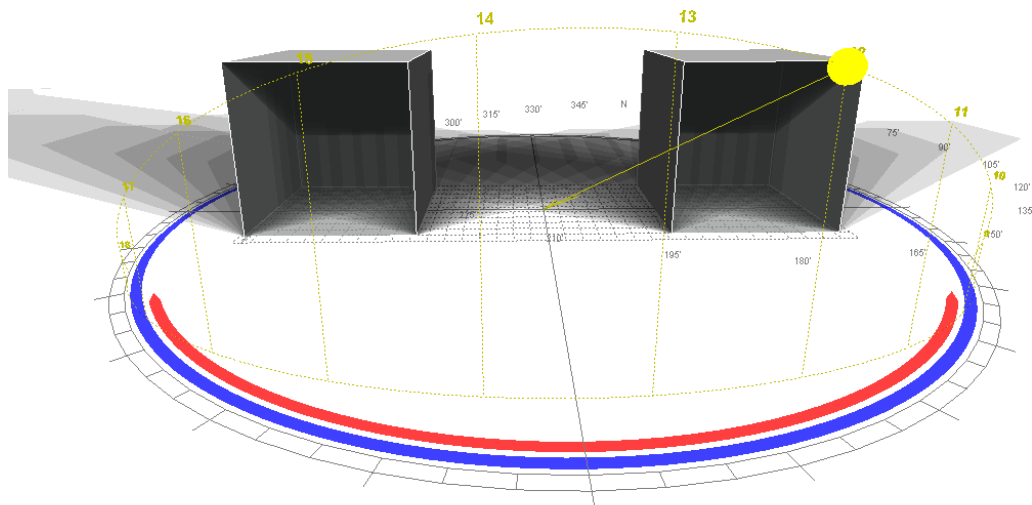


Fig. 6-8. Resultado final de modelización con Ecotect 5.6. Fuente: archivo propio.

### 6.6.2. DIFERENCIACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ZONAS

Una vez modelizado el ensayo, definiremos unos parámetros básicos del Ecotect, esenciales para la comprensión del funcionamiento de dicho programa.

El Ecotect trabaja con la identificación y diferenciación de dos tipos de zonas:

- **Zonas térmicas:** Una zona térmica es definida en el Ecotect como un volumen homogéneo de aire, encerrado en sí mismo.

Puede estar formado por un grupo de habitaciones o una zona del edificio, siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- Si en ellas se desea mantener el mismo rango de temperatura y humedad.
  - Si el aire en su interior de la zona es capaz de mezclarse libremente.
  - Si en caso de utilizarse algún sistema de climatización mecánico será compartido por las áreas que conforman la zona.
- **Zonas no térmicas:** no participan en el volumen, temperatura o en el cálculo de cargas térmicas. Sin embargo, estos elementos reflejan y provocan sombra sobre otras partes del edificio afectando su comportamiento energético. Ejemplo de elementos en zonas no térmicas: cornisas, voladizos, árboles, etc.

En nuestro caso, puesto que se trata de la comparación de dos cajas, se han establecido dos zonas térmicas. Las zonas no térmicas, no serían de aplicación y uso en nuestro caso.

Tabla 6-III. Tabla de las características de zonas aplicadas al programa Ecotect.

Zona	Espacio	Tipo de zona	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
1	Caja 1	Térmica	0.360	0.217
2	Caja 2	Térmica	0.360	0.217

Una vez establecidas y diferenciadas las zonas se procede a la caracterización de las condiciones internas que se desean establecer, como aire acondicionado, ocupación... Por ser unas cajas de ensayo, la ocupación y actividad será nula, así como la existencia de aire acondicionado-calefacción.

Se establecerá la línea de confort en un rango elevado; de 18 a 26°C, con un 50% de humedad y un nivel de iluminación básico de 300 luxes. Esta tabla, es de alta importancia, cuando se trata de análisis energético, ya sean lumínicos o térmicos de edificios, pues podemos llegar a definir, por ejemplo, el horario de funcionamiento del edificio, eficacia o tipo del aire acondicionado, tasa de

infiltración, que afectará en el comportamiento global del edificio. Al tratarse de unas cajas de ensayo sencillas, la tabla queda establecida del siguiente modo:

Tabla 6-IV. Tabla de asignación de las características y control de zonas al programa Ecotect.

<b>CAJA 1 y 2</b>				
<b>Características</b>		<b>Valor</b>	<b>Otros datos 1</b>	<b>Otros datos 2</b>
Condiciones internas de diseño.	Nº Clo	1	-	-
	Humedad	50%	-	-
	Velocidad del aire	0.15 m/s	Ligeramente advertible	-
	Nivel de iluminación	300 Lux	-	-
Ocupación	Actividad	0 personas	-	-
	Tasa de infiltración.	1 renov/h	-	-
HVAC	Tipo	-	-	-
	Eficiencia	-	-	-
	Termostato	18-26°C	-	-
	Horario de funcionamiento.	-	-	-

### 6.6.3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES OPACOS

Introducción de los siguientes parámetros:

- Factor U: programa Therm y Ecomat.
- Admitancia: calculado por el propio Ecotect y Ecomat
- Absorción solar: calculado por el propio Ecotect
- Transmitancia visible.
- Desfase térmico: calculado por Ecomat
- Factor de amortiguación térmico: calculado por Ecomat

Aunque el Ecotect es capaz de calcular todos los datos salvo el desfase térmico y factor de amortiguación, una vez que se le han introducido todas las capas que compone el cerramiento, se ha podido observar errores de algoritmo en su cálculo,

especialmente con las cámaras de aire, por lo que se introducirán manualmente los valores obtenidos tanto por el programa Therm como por Ecomat<sup>126</sup>.

#### 6.6.3.1. CARACTERIZACIÓN TÉRMICA CON THERM

Previo a la asignación de materiales mediante el programa de simulación principal anteriormente comentado, es necesaria la realización de un estudio teórico-práctico del cerramiento de la caja del ensayo físico, partiendo del programa Therm, para el cálculo del comportamiento térmico de la pared opaca del ensayo en cuestión. Un buen estudio de este tipo, nos permite la comprobación de cerramientos a nivel de puentes térmicos, por ejemplos en esquinas, que un programa de simulación no es capaz de detectar, por trabajar con datos de la composición típica de un cerramiento. Esquinas, cambios de material etc. son puntos fundamentales a tratar. El programa Therm es un programa de simulación por ordenador en dos dimensiones para análisis de transferencia de calor en componentes de edificios tales como ventanas, paredes, cimentaciones, cubiertas, puertas y otros elementos donde los puentes térmicos pueden estar presentes.

El cerramiento se ha dibujado previamente en un programa de dibujo tipo "cad" (Autocad 2006), y exportado al programa Therm como extensión "dxf"<sup>127</sup>. Una vez caracterizados e introducidos los materiales, se calcula por dicho programa a partir de los valores de resistencia superficial (Rs) dados por el CTE.<sup>128</sup>

La siguiente tabla muestra los parámetros básicos introducidos al programa, previa simulación.

---

<sup>126</sup> Para más información de éste y otros programas utilizados en la presente investigación ver: Anexo 3. Metodología de la simulación. Anexo de la metodología de la simulación. Programas.

<sup>127</sup> La extensión DXF (acrónimo del inglés: Drawing Exchange Format) es un formato de archivo informático para dibujos de CAD, creado fundamentalmente para posibilitar la interoperabilidad entre los archivos .DWG, usados por el programa AutoCAD, y el resto de programas del mercado.

<sup>128</sup> Las resistencias térmicas superficiales representan la dificultad a la transmisión de calor que se produce por cambio de un medio transmisor a otro (del aire al elemento constructivo o viceversa). En rigor, las resistencias térmicas superficiales dependen de la temperatura, de la velocidad del aire y de la emitancia de las superficies. El CTE-HE1. (Apéndice E), Tabla E.1 *Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior en m<sup>2</sup>K/W*, fija los parámetros para resistencia superficial (Rse y Rsi) para Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal >60° y flujo Horizontal en 0.04 y 0.13 respectivamente.

Tabla 6-V. Tabla características materiales introducidos en el programa Therm. Fuente: realización propia.

NOMBRE	CONDUCTIVIDAD W/m-K	EMISIVIDAD	ESPESOR mm
Contrachapado de madera	0.09	0.90	12
Aislamiento térmico de Poliestireno extruido	0.16	0.90	40
Aislamiento reflectivo compuesto por una lámina de Aluminio puro 100% de 8µ + 4mm de burbuja de polietileno FR. Marca: Polynum	0.11	0.05	4

Una vez simulado, obtenemos los siguientes resultados:

FACTOR U CERRAMIENTO: 0,42 W/m<sup>2</sup> K

En la siguiente imagen se observan las isoterms en la sección según el eje Y. Estas isoterms, son útiles para ver el gradiente de temperatura elevados (isoterms muy juntas), que pueden conllevar el análisis de puentes térmicos, o identificar zonas frías, con el fin de predecir degradaciones térmicas o condensaciones.

En la imagen se observan isoterms paralelas, lo que indica un comportamiento homogéneo del cerramiento.

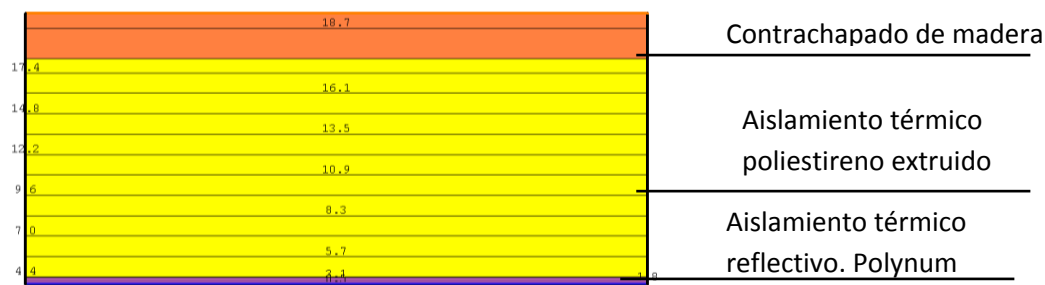


Fig. 6-9. Estudio del flujo de isoterms con el programa Therm 5.2 (LBNL)

Temperatura máxima: 15.69 °C

Temperatura mínima: 1.325 °C

Temperatura exterior: 0°C

Temperatura interior: 20°C

La siguiente imagen, muestra las isoterms, en colores. Cada temperatura representa mediante un color diferente, desde los colores fríos (azules y violetas) como temperaturas bajas, y colores cálidos (rojos y amarillos) como temperaturas altas.

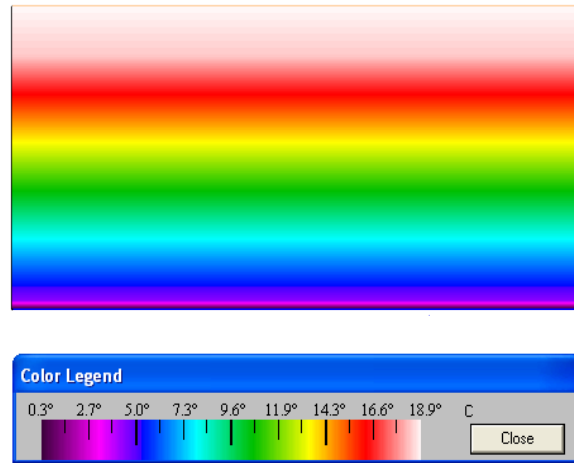


Fig. 6-10. Estudio del flujo de isotermas en bandas de color con el programa Therm 5.2 (LBNL)

La siguiente imagen muestra el flujo de vectores resultantes, que indica la cantidad y dirección del flujo de calor a través de dicha sección. La longitud del vector corresponde a la cantidad de calor que fluye a través del elemento, la cual va en función del elemento y de la magnitud del flujo de calor. La dirección de las flechas indica el sentido del flujo de calor. Esta representación es utilizada principalmente para determinar la dirección del flujo.

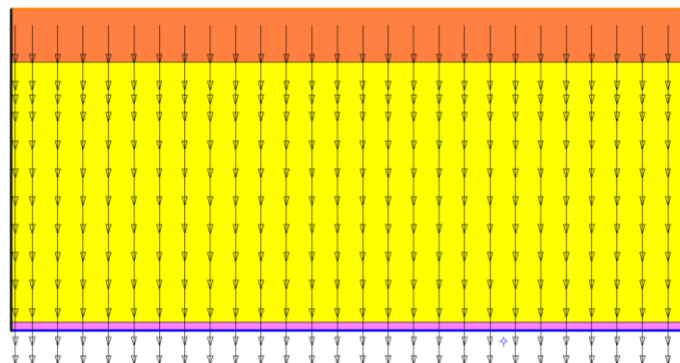


Fig. 6-11. Estudio de vectores de flujo de calor con el programa Therm 5.2 (LBNL)

#### 6.6.4. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES TRANSPARENTES EN ECOTECT

Se ha explicado anteriormente el proceso de obtención y caracterización de los vidrios elegidos mediante el programa Window 5.2, comparándolo con los datos del fabricante nacional.

Una vez obtenidos, y debido a su similitud como se ha dicho anteriormente, introducimos los siguientes datos en la librería del Ecotect para generación de vidrios o/y ventanas.

Factor U; Admitancia; SHGC; Índice de refracción del vidrio; Alternancia de las ganancias solares<sup>129</sup>, Color resultante, una vez convertidas de las coordenadas L\*a\*b a RGB (Ver anexo 3).

Cualquier error en la introducción de estos datos, o una pequeña confusión, haría fácilmente fracasar toda la simulación, por lo que se ha de prestar especial atención.

Primero se realizará una simulación lumínica de sombras observando el heliocamino en las diferentes épocas del año (equinoccio y solsticio), intentando simular en todo momento el ensayo real.

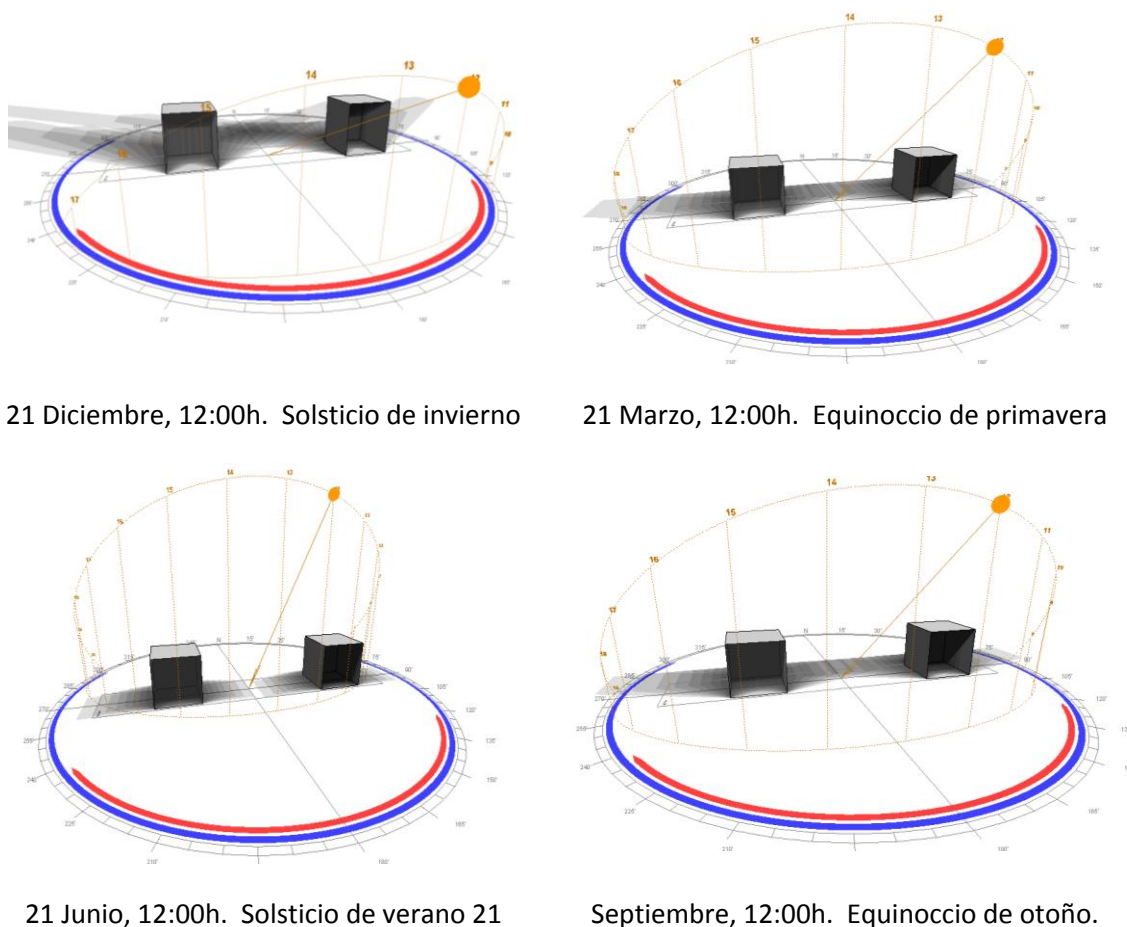


Fig. 6-12. Imágenes de la posición heliocamino en los distintos periodos. Fuente: realización propia.

### 6.6.5. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN

En la simulación, se va a calcular principalmente la temperatura interior de la caja.

La temperatura del aire, tal y como indica el libro "Técnicas arquitectónicas y Constructivas de Acondicionamiento Ambiental" (1997), de Javier Neila indica que:

<sup>129</sup> Los datos para la Alternating Solar Gain proceden de la tabla 5.7 de CIBSE Admittance Method. CIBSE Guide A (1999). Según recomendaciones de los autores en la siguiente página web del Ecotect: <http://ecotect.com/node/137>.



*"la temperatura del aire, que está condicionada muy directamente por la radiación solar, es un parámetro fundamental del clima, y depende en gran medida de la naturaleza de la superficie.*

La temperatura<sup>130</sup> es generalmente la variable medio ambiental más importante que afecta al confort térmico. Un cambio de tres grados, cambiaría la respuesta en la escala de sensaciones térmicas aproximadamente un nivel para personas sedentarias. Personas activas son menos sensibles a cambios en la temperatura de un recinto o espacio.

Valor del índice de sensación térmica:

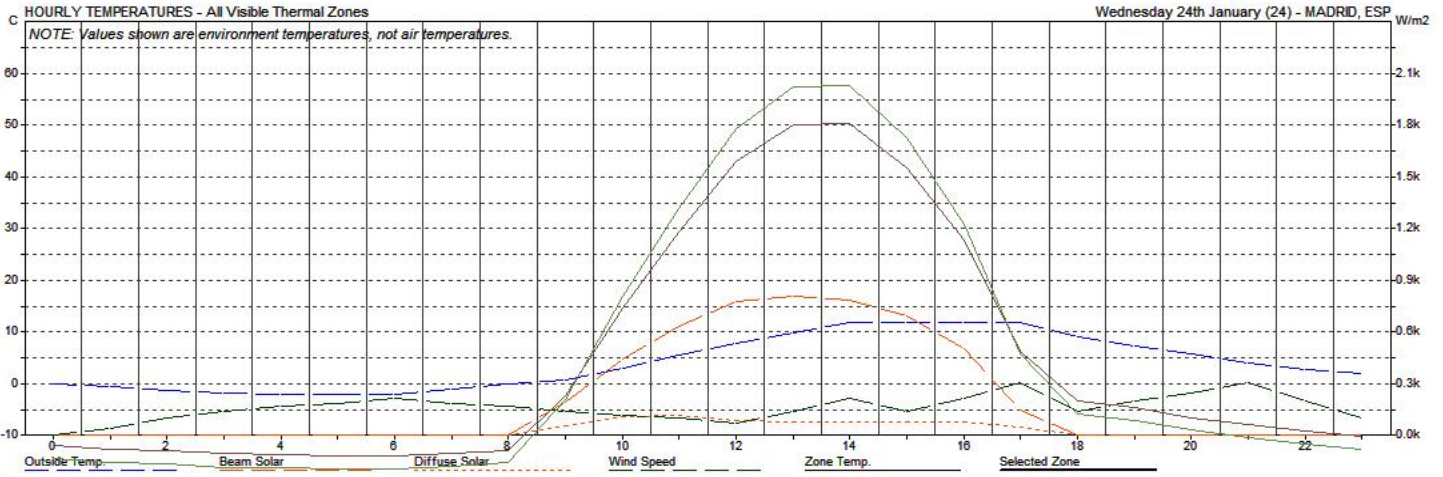
- +3 Hot
- +2 Warm
- +1 Slightly warm
- 0 Neutral
- 1 Slightly cool
- 2 Cool
- 3 Cold

Calculamos la temperatura interior del aire, acumulada en el interior de las cajas de ensayo, como se puede observar en la siguiente gráfica, donde en el eje de las abscisas queda representada las horas del día, y en el de ordenadas la temperatura en °C, para un típico día de invierno, orientación Sur. En la imagen adjunta, los valores fundamentales a observar son:

- Verde, la temperatura del vidrio sencillo.
- Burdeos: temperatura del vidrio doble.
- Amarillo: Irradiación global para cada momento del día. (día soleado).
- Azul: Temperatura exterior.

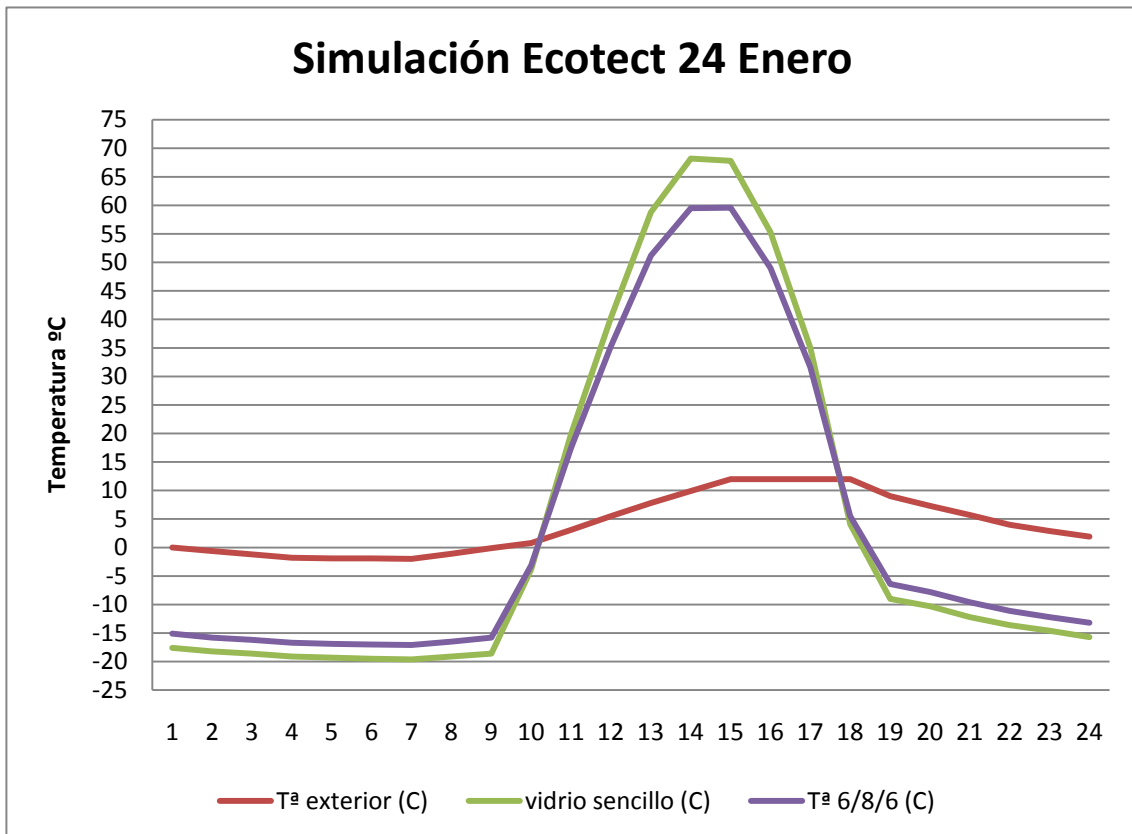
---

<sup>130</sup> Guía CIBSE 2006. Environmental Design. 1.3.11. Temperature.



Gráfica 6-1. Gráfica temperaturas horarias en ambas zonas. Fuente: Ecotect v.5.6

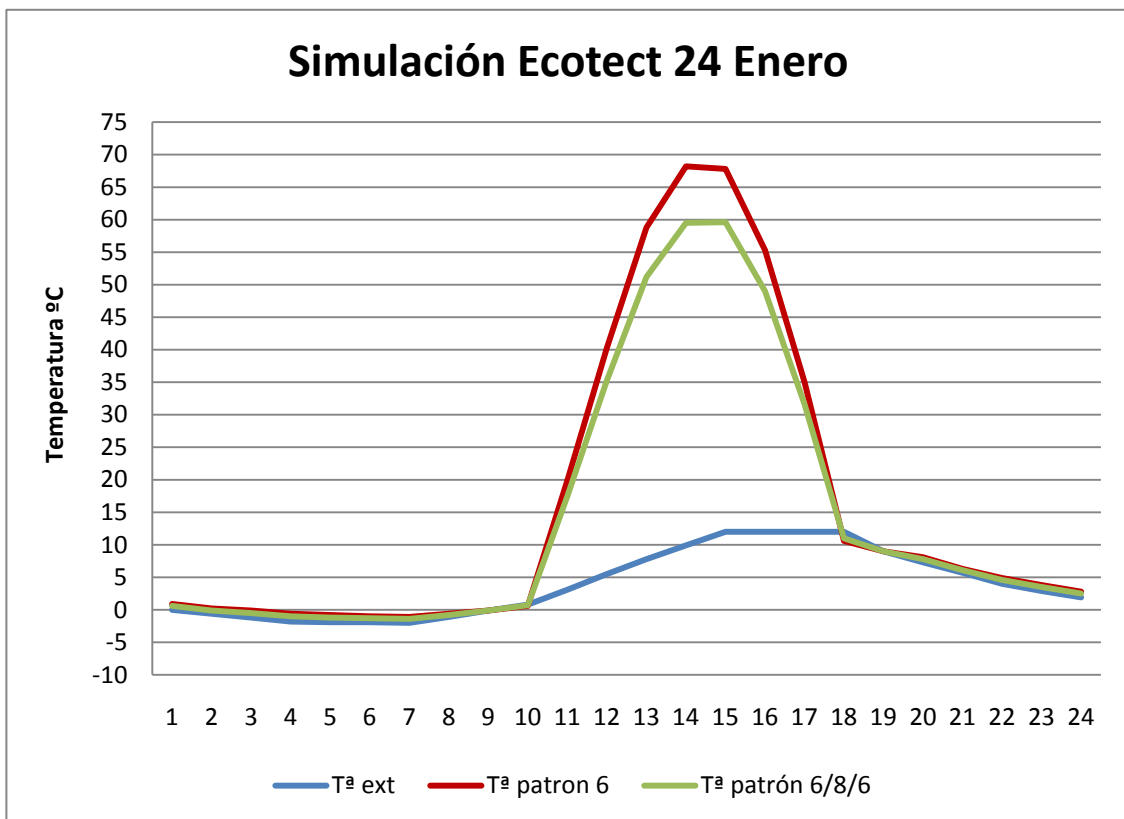
En una hoja de cálculo quedaría de la siguiente forma.



Gráfica 6-2. Gráfica temperaturas horarias en ambas zonas. Fuente: Ecotect v.5.6

Como se observa en la gráfica 6-1 y 6-2, se produce un sub-enfriamiento, dando unos valores del vidrio de unos 10°C por debajo de la temperatura exterior en la noche, lo cual, es imposible.<sup>131</sup>

Una vez, analizadas y conjuntadas ambas simulaciones, diurna y nocturna, obtenemos la siguiente imagen, donde queda representada en el eje de las abscisas las horas, y el eje de las ordenadas la temperatura. Se observa claramente la diferencia de temperatura al comparar el vidrio doble con el sencillo. Consultando expertos en el programa, entre ellos se destaca la colaboración de Sergio Saiz y de Germán Campos, éste último, ex colaborador del CIDEMCO, y actual colaborador con Andrew Marshall en el desarrollo del Ecotect pudimos llegar a varias conclusiones, no favorables para el programa, después de comentarle los problemas con los que nos encontrábamos. Debido a este error, nos vemos obligados a hacer un cálculo nocturno aparte, sin la influencia de la radiación solar, y hacer por lo tanto la simulación en dos pasos: diurno, con la influencia de la radiación solar, y nocturno, eliminándola.



Gráfica 6-3. Grafica comparación Ecotect vidrio doble-sencillo 24 Enero. Fuente: Ecotect. Realización propia.

<sup>131</sup> Tras haber consultado a expertos en la materia, entre ellos, a Sergio Saiz, responsable del departamento de Construcción en el área de Energía y Medio Ambiente de los Laboratorios CIDEMCO, el algoritmo de cálculo que emplea el programa presenta un error apreciable en el intercambio de calor con la bóveda celeste de noche (temperatura del cielo de noche mucho menor, y como consecuencia se produce esta caída).

La gráfica sigue dando datos erróneos, al compararla con los ensayos físicos. Uno de los puntos clave es la misma pendiente que adquiere la gráfica, tanto en la ganancia de temperatura como en pérdidas, resultando ser casi simétrica, tanto en pérdidas como en ganancias.

Con el modelo de referencia definido, las simulaciones iniciales, tal y como se han realizado, deberían darnos el comportamiento de los sistemas constructivos y respuesta energética del edificio, una vez asegurándonos que el modelo ha sido adecuadamente definido y todos los parámetros introducidos son correctos (modelización, introducción parámetros de las condiciones internas de las zonas y caracterización de datos de los cerramientos tanto opacos como transparentes). Una revisión del modelo y los resultados asociados actuaría como una prueba final de la validez del modelo.

#### **6.6.6. ERRORES Y FALLOS DETECTADOS EN EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN**

El tema de los algoritmos incorrectos del Ecotect no es sencillo de entender, y más sin poder entrar al código del programa. El programa, según hemos comprobado con varias pruebas, y según diversas consultas a Germán Campos, tiene unos errores en el algoritmo de cálculo en la entrada de los parámetros Alternating Solar Gain Factor y SHGC, que pasamos a describir a continuación.

Lo que debería hacer Ecotect es:

- Calcular la radiación media diaria:  $I_m$ .
- Calcular la radiación oscilante (la radiación en cada instante del día menos la radiación media):  $I_o$ .
- Calcular la carga asociada a la radiación solar como: Solar Heat Gain Coeff.  $\times I_m + \text{Alt Solar Gain} \times I_o$ .

Una de los primeros problemas observados, no es estrictamente un fallo, y se refiere a que para calcular la carga solar que entra en la zona, Ecotect considera el producto del SHGC por la Transmitancia visible (VT) cuando son conceptos diferentes. La VT es la fracción visible que atraviesa el vidrio mientras que el SHGC sería el equivalente al denominado factor solar, que incluiría toda la carga solar entrante y rerradiada al interior desde el vidrio.

Ecotect calcula la carga solar entrante como el producto SHGC  $\times$  VT cuando estrictamente sería sólo SHGC. Y por eso se recomienda o bien poner VT=1 o bien poner la combinación tal que SHGC  $\times$  VT sea igual a lo que nosotros llamamos factor solar (g), por lo que ya son valores de entradas no directos y alterando los valores que dan los fabricantes.

El SHGC se calcula como el  $S_c$  (Factor de sombra) multiplicado por el factor solar de un vidrio monolítico (0,87).

Otro de los valores erróneos es el denominado Alt Solar Gain Factor. Lo primero que se ha de entender viene de la guía CIBSE<sup>132</sup> y es relativo a que el método de cálculo considera una ganancia solar alternante y una constante (esto es el fundamento del método, dividir en una parte continua y otra oscilante). Y dicho método establece una "especie" de factor solar para la carga solar constante (la media diaria) y otro factor solar diferente para la carga solar alternante (la oscilación respecto a la fija).

El Alternating Solar Gain Factor representa la variación de la carga solar en un punto interior de un recinto, debida a ambas radiaciones, directa y difusa, y la variación de la irradiación solar en las superficies acristaladas. Esto ocasiona, que dicho factor no sea constante durante todo el día, y que no haya un valor único representante para todas las horas. Además dichos factores dependerán del tipo de cerramiento interior, dependiendo entre pesado y ligero dado que el método considera que un cerramiento inercial reacciona diferente a la radiación que uno no inercial y ésta (la radiación) se transforma en carga térmica dentro del espacio de manera diferente (atenuada y desfasada). Por otro lado es un factor, que es extremadamente difícil obtener, por no decir imposible.

Además en función del tipo de cerramiento de la zona en cuestión, se calcula el factor de superficie F para determinar si la zona es Heavyweight o Lightweight (pesada o ligera). Si es pesada Ecotect deberá utilizar el Alt Solar Gain (*Heavywt*) y si es ligera, deberá utilizar el Alt Solar Gain (*Lightwt*), usando solo uno en función del tipo de zona, aplicando además un desfase en el cálculo de la carga (2 horas o 1 hora). En resumen, Alt Solar Gain es la fracción de radiación oscilante que acaba transformándose en carga interna.

Sin embargo, Ecotect realmente aplica a la radiación incidente el producto Solar Heat Gain Coeff x Tv x Alt Solar Gain, como una especie de factor solar, sin dividir en fracción oscilante y media y multiplicando todos los factores (eligiendo entre *pesada* y *ligera*).

Pues bien, en Ecotect se puede observar fácilmente que si se modifica los factores Alternating Solar Gains, las ganancias solares se modifican proporcionalmente (lo más sencillo es poner 0 y se reducen totalmente). Lo cual es incorrecto, dado que dichos factores sólo deberían afectar a la fracción oscilante de la carga solar. Ese es el principal fallo en el algoritmo de Ecotect.

---

<sup>132</sup> CIBSE Guide A (1999). Environmental design. 5.6.3.3 Parameters associated with solar gain (Pag 5.14) "The thermal load on a space due to solar irradiation depends upon the radiation transmitted by and absorbed within the glazing system. The amount of radiation transmitted and absorbed is a function of the intensity of the incident radiation and the angle of incidence between the solar beam and the glazing. Therefore, for an accurate determination of this load, it is necessary to calculate the gain occurring at various times of the day. A computer based method is required to achieve this cost effectively. However, if the objective is to determine either the maximum space temperature or the maximum cooling load, the transmission and absorption characteristics calculated at the time of peak solar irradiation are often the most significant".

The response of a space to solar radiation transmitted and absorbed in the glazing system is characterised by two parameters, see Appendix 5.A4: Derivation of solar gain factors

— mean solar gain factor

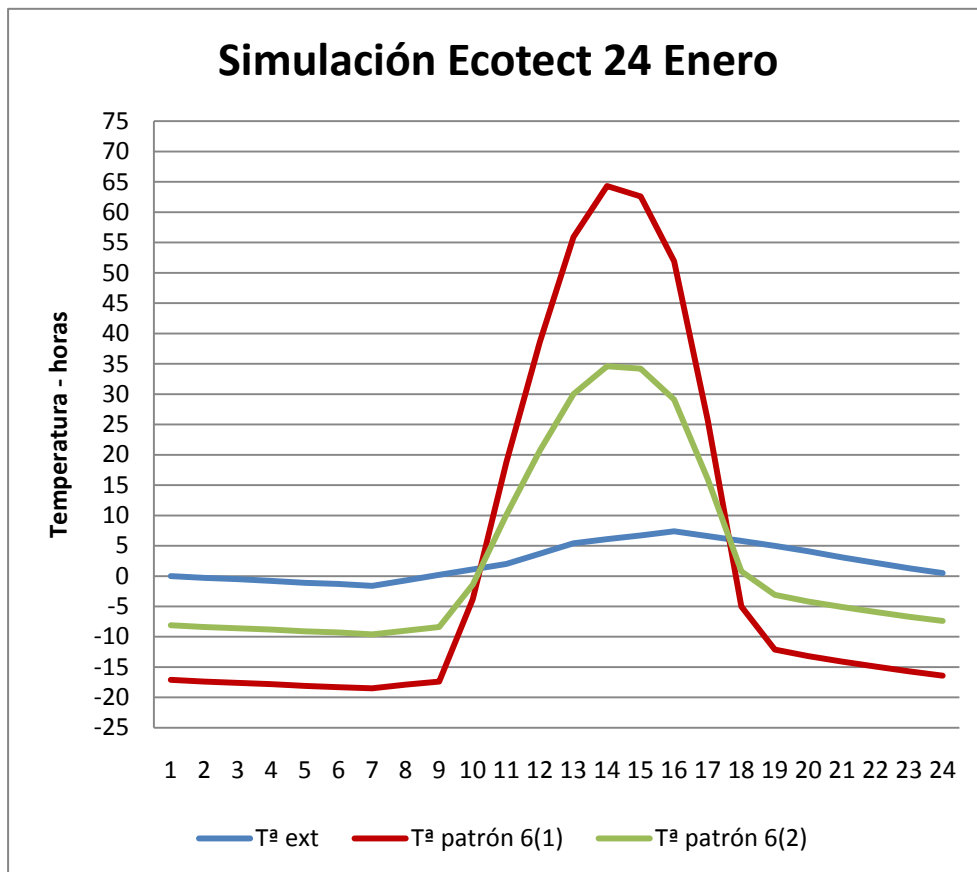
— alternating solar gain factor. alternating solar gain factor: the swing in solar load due to the sum of direct transmission and indirect gain from the surface of the glazing, divided by the swing in the external incident irradiation.

Por otro lado consultando foros<sup>133</sup>, recomiendan una reconfiguración de los parámetros del vidrio en el programa como valor 1 en SHGC, la admitancia igual que el factor U, y las Alt Solar Gains, como 1.

Para ello se ha hecho una simulación de un mismo vidrio cambiando los valores de SHCC y Alt Solar Gain, según la siguiente tabla, tomando por defecto los siguientes valores:

Tabla 6-VI. Tabla distintas características de dos tipos de vidrios introducidas al Ecotect.  
Fuente: realización propia.

Tipo de vidrio	SHGC	VT	Alt solar Gain (Heavywt)	Alt solar Gain (Lightwt)
<b>Vidrio sencillo 1</b>	1	0.83	1	1
<b>Vidrio sencillo 2</b> (material definido por defecto por el Ecotect)	0.94	0.753	0.47	0.64



Gráfica 6-4. Gráfica de la diferencia entre dos tipos de vidrios iguales pero simulados con distintas características. Fuente: Ecotect. Realización propia.

<sup>133</sup> Grupo de discusión Autodesk. <http://forums.autodesk.com/t5/Autodesk-Ecotect-Analysis/>

Otro de los errores en algoritmo detectados, es como se ha comentado anteriormente, es la bajada drástica de la temperatura interior en horas nocturnas, de de 10 a 20°C, por debajo de la exterior, creyendo que es debido de nuevo a un error en el algoritmo de cálculo de las radiaciones. Como se ha comentado anteriormente, se basa en un cálculo dividido en una parte continua y una parte alterna (divide todas las excitaciones en su componente media y la parte oscilante respecto a la media (guía CIBSE). Durante la noche se considera que la radiación tiene una oscilación negativa respecto a la media (la media de la radiación diaria) y ese efecto sobre el procedimiento general de cálculo origina que la temperatura oscile por debajo de la exterior (es como si el programa entendiera una radiación negativa). Dado que el tratamiento de las fracciones solares alternantes no funciona correctamente en Ecotect es una razón adicional para suponer que ese comportamiento viene derivado del método de cálculo.

Por lo que aplicando incluso estos criterios, los valores son muy cambiantes (la temperatura interior varía 30°C), por lo que no nos parece una herramienta adecuada para simulación térmica, aunque si está recomendada para cuestiones de soleamiento e iluminación natural (con la ayuda del programa Radiance<sup>134</sup>) pero la parte térmica tiene unas limitaciones muy grandes y sólo debería utilizarse de modo comparativo y en las fases iniciales de diseño. (Ver estudio lumínico 3.1.5).

Aunque se han realizado simulaciones energéticas, tales como se han citado anteriormente (Prototipo Solar Decathlon 2007 de la UPM, Accademia Belle Arti y Edificio Altra Economia ambos en el Mattatoio di Testaccio (Roma)). Los resultados que se obtienen son coherentes según el tipo de edificio que estamos tratando. Se trata por tanto, de grandes edificios, por lo que los errores de algoritmo que tiene el Ecotect no se llegan a valorar. Se aprecian al realizar pequeñas simulaciones, como la presente, en el que un pequeño cambio en los parámetros, hace cambiar enormemente la simulación. El Ecotect, por tanto, está pensado para las primeras fases de diseño de un proyecto y obtener resultados a modo comparativo de funcionamiento y una aproximación cualitativa de los resultados. Los algoritmos de funcionamiento de Ecotect para el cálculo térmico, basados en la guía CIBSE, son únicamente adecuados, para cálculos de refrigeración, tal y como indica dicho documento. Se debería por tanto usar Ecotect para propósitos de visualización (cálculo) de sombras, radiación) y estudios de iluminación natural a través de Radiance. El cálculo térmico debería solamente usarse, para comparar diferentes alternativas en estados de anteproyecto y durante el diseño. De este modo, es decir, comparando diferentes alternativas, conseguimos la precisión en el cálculo, no medir el desarrollo y precisión de Ecotect.

Esto, no solo se ha comprobado mediante simulaciones, sino que se ha encontrado un artículo [Hensen(2004)]<sup>135</sup> que se adjunta en el anexo 1: artículos, sobre las deficiencias del análisis térmico de Ecotect en el que se advierte, que un programa altamente extendido y comercializado, no necesariamente garantiza su calidad, concluyendo que el principal ingrediente para profesionales son el dominio del conocimiento y aptitudes del usuario para verificar y validar el comportamiento del software de simulación. La simulación es mucho más efectiva cuando se comparan

<sup>134</sup> Radiance v.3.9 (2008). Programa de cálculo lumínico natural y artificial en ambientes interiores, desarrollado por el LBNL. <http://eetd.lbl.gov/eetd-software-rad.html>.

<sup>135</sup> (Hensen & Radošević, 2004)

el comportamiento de diversas alternativas de diseño, más que cuando se usa para predecir el comportamiento de un solo diseño en sentido absoluto. Al comprobar los errores que comenta Hense, coinciden con los analizados anteriormente.

En cuanto a los cerramientos opacos, el problema que se ha encontrado es su falta de exactitud. Como se ha comentado anteriormente, el programa de simulación no es capaz de detectar, por trabajar con datos de la composición típica de un cerramiento, esquinas, cambios de material etc.... que son puntos fundamentales a tratar. El programa Therm, que se propone en sustitución, es un programa de simulación por ordenador en dos dimensiones, como ya se ha comentado, para análisis de transferencia de calor en componentes de edificios tales como ventanas, paredes, cimentaciones, cubiertas, puertas y otros elementos donde los puentes térmicos pueden estar presentes.

Por otro lado, si comparamos el defecto del factor U, entre el calculado por el Therm y el Ecotect, observamos la siguiente diferencia:

Factor U Ecotect: 0.640 W/m<sup>2</sup>K

Factor U Therm: 0.42 W/m<sup>2</sup>K

Hay una diferencia de 0.22, que es bastante considerable. Esto es debido a la resistencia superficial del aire que considera, basada el Ecotect en la guía CIBSE-2006136, viene ya predeterminada por el programa. Sin embargo en el Therm, podemos definir la resistencia superficial deseada, o bien basándonos en nuestra propia normativa.

A continuación establecemos un cerramiento con cámara de aire.

Para hacer la prueba vamos a añadir al mismo cerramiento una cámara de aire<sup>137</sup> de 3 cm, para ver el efecto.

Factor U Ecotect: 0.57 W/m<sup>2</sup>K

Factor U Therm: 0.39 W/m<sup>2</sup>K

Donde hay una diferencia de 0.18.

Son desviaciones, no muy grandes, por tratarse de un cerramiento sencillo. Se ha visto, que a mayor complejidad de cerramiento, las desviaciones son mayores. Esto puede ser debido, bien a lo anteriormente comentado de la resistencia superficial, o a algoritmos erróneos internos al programa.

Otro problema en cerramientos opacos, es la imposibilidad de introducir el valor de la emisividad infrarroja de los materiales, que viene ya predeterminada por el

---

<sup>136</sup> "The inside and outside surface resistances are determined by the processes of heat transfer which occur at the boundary between a structural element and the air. Heat is transferred both by radiation interchange with other surfaces and by convective heat transfer at the air/surface interface". Guía CIBSE 2006. Pag. 3-6.

<sup>137</sup> "Heat transfer across an air space is a proximately proportional to the difference between the temperatures of the boundary surfaces. However, the thermal resistance depends upon various other factors such as the dimensions of the air space, the direction of heat flow, the emissivities of the inner surfaces and the extent to which the airspace is ventilated". Guía CIBSE 2006. Pag. 3-6.



programa, y no puede ser cambiada. Esto se compensa con que la mayoría de los materiales tienen un valor bastante alto<sup>138</sup>, pero no permite la introducción de materiales opacos de baja emisividad, como puede ser un aislamiento térmico reflectante, muy usado actualmente.

Debido a que los resultados, que no eran exactamente los esperados, profundizando en el programa, se llegó a la conclusión de que el Ecotect traía consigo errores en los algoritmos de cálculo de los parámetros usados en la caracterización de los vidrios principalmente dando lugar a soluciones incoherentes, y descartando por tanto el uso de dicho programa para estos cálculos. No solo hablamos por tanto de la dificultad de caracterizar un vidrio sencillo a la hora de introducir los parámetros, sino de la imposibilidad de simular otros tipos de vidrios, ya sean bajos emisivos o de control solar.

Volviendo a analizar la lista de programas del DOE<sup>139</sup> de software de Simulación energético, y hablando con expertos, nos recomiendan el uso del DesignBuilder<sup>140</sup>, nacido aproximadamente en Abril del 2006, y desarrollado y mejorado muy rápidamente, y las primeras simulaciones realizadas son coherentes con la realidad.

Nos parece imprescindible, por lo tanto, hacer nuevas simulaciones con este nuevo programa, cuyas simulaciones se describirán a continuación.

La modelización de las condiciones internas de zonas, es básicamente la que se ha seguido con Ecotect, por lo que se describirán someramente, pues ya han sido explicadas anteriormente. Las principales diferencias se encuentran en la introducción de datos de los vidrios. El DesignBuilder a partir de ahora denominado (db), trabaja directamente con la IGDB (International Glazing DataBase) anteriormente comentada, y basada en el sistema de cálculo del programa Window, mucho más precisa y detallada que la del Ecotect (ec), llegando a la precisión de utilizar valores espectrales para la caracterización de los vidrios.

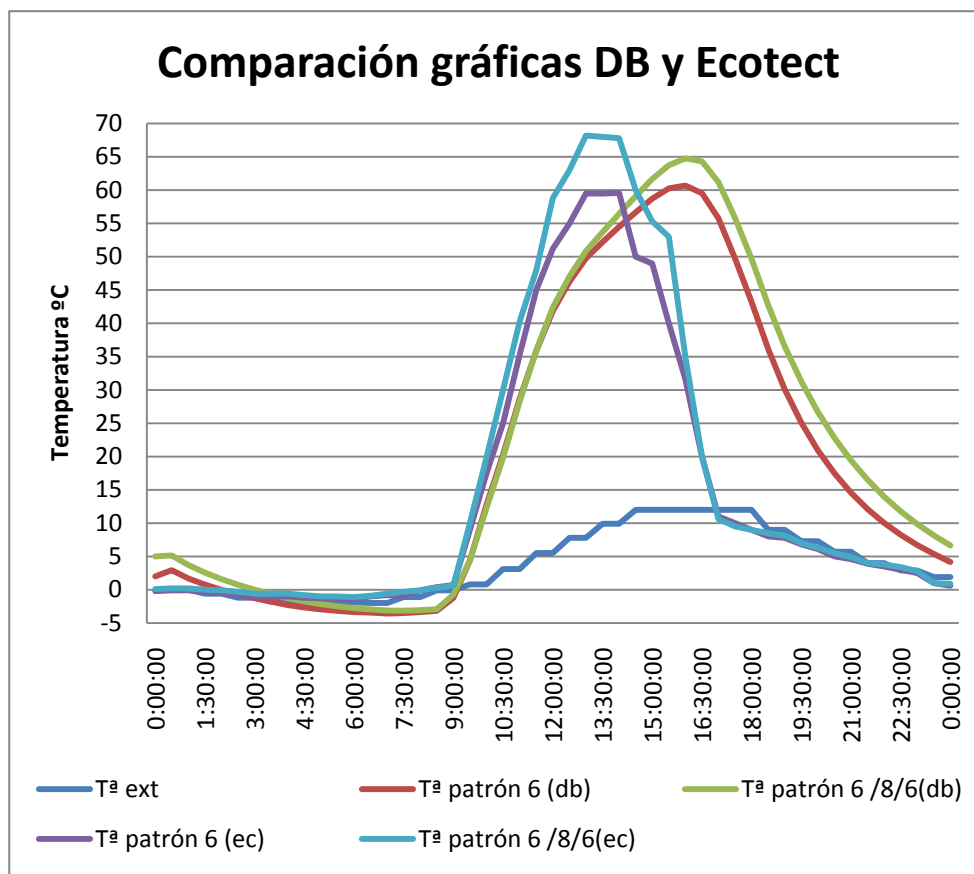
Para hacer una comparación con los resultados de Ecotect, se utilizarán los mismos parámetros meteorológicos y la misma orientación (Sur) en ambas, pudiendo observar las diferencias a la que nos enfrentamos de ambos programas.

---

<sup>138</sup> CIBSE guide A. 2006

<sup>139</sup> [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/alpha\\_list.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/alpha_list.cfm)

<sup>140</sup> DesignBuilder v.2.1.0.025. Motor de cálculo Energy Plus 4.0. (DesignBuilder Software Ltd).



Gráfica 6-5. Comparativa resultados Ecotect-DesingBuilder 24 Enero. Fuente: realización propia.

Como se puede observar, las gráficas del Ecotect, alcanzan el máximo de temperatura a las 13.30h, mientras que las del DesignBuilder lo alcanza sobre las 16:30, con 3 horas de adelanto. Eso es debido en principio al error del algoritmo del Ecotect con la inercia térmica, como se había comentado anteriormente, en las simetrías en las ganancias con las pérdidas en la gráfica del Ecotect, obviando el hecho de realizar la simulación en dos pasos, diurna y nocturna, teniendo o no en cuenta la influencia de la radiación solar.

## 6.7. SIMULACIONES

### 6.7.1. MODELIZACIÓN Y DESARROLLO

Con carácter previo al comienzo del proceso de simulación se ha realizado unos tanteos previos con el fin de simular el comportamiento térmico de los vidrios bajo emisivos que posteriormente se van a ensayar (DAG-30, AN-62, SUPER-E) con el DesignBuilder en sus dos caras (cara 2 y cara 3) y obtener unas ideas previas de su comportamiento final.<sup>141</sup>

<sup>141</sup> Ver anexo 3: Metodología de la simulación/Anexo metodología de la simulación/3.Tanteos preliminares para la caracterización de vidrios con capa metálica para la simulación. Ver conclusiones, punto 2.

La modelización, debido a su sencillez, se ha realizado directamente en el programa, caracterizando tanto los cerramientos opacos como los transparentes, introduciendo directamente las características técnicas de los materiales, obtenidos directamente de los fabricantes. El análisis térmico del cerramiento opaco, ha resultado ser el mismo que el obtenido con el programa Therm.

Sin embargo el Window, nos permitiría el cálculo de otros valores, como el llamado coeficiente de sombra entre otros, y da la posibilidad de elegir entre las dos condiciones medioambientales: NFRC National Fenestration Rating Council y CEN (European Committee for Standardization), esta última la aplicable en España para el CTE.

El DesignBuilder, sin embargo, solo permite el cálculo a través de la NFRC (viene por defecto incorporadas en el algoritmo de cálculo) y una vez calculadas no permite cambios, a diferencia del Ecotect.

Antes de proceder a la simulación, se ha procedido a comparar los resultados de la simulación con Window (Condición medioambiental CEN), con los parámetros de la empresa<sup>142</sup> con los obtenidos en el DesignBuilder (Condición medioambiental NFRC), de modo que podemos observar la fiabilidad del programa de simulación Window para la caracterización de vidrios.

Para ello, en la siguiente tabla, compuesta por 4 filas y 6 columnas, en la se va a analizar los dos vidrios de control solar testados, los tres bajo emisivos y un doble vidrio común. En las columnas se expresa la procedencia de datos, la composición, y los parámetros U, Tv y g, distinguiendo entre los cedidos por la empresa, y los calculados mediante el programa Window y el DesingBuilder.

Para ello primero se ha realizado una caracterización de los parámetros de los datos de los vidrios ensayados, con los programas de simulación, siendo ambos capaces de calcular los parámetros principales de las propiedades térmicas y ópticas de cualquier composición de vidrios y de ventanas que queramos generar (factor U, Sc, SHGC, Tv...) a partir de una extensa y actualizada base de datos de vidrios de los principales fabricantes del mundo (IGDB: Internacional Glazing DataBase), desarrollada por el National Fenestration Rating Council (NFRC) y certificada con la ISO 15099 standard y ASHRAE SPC<sup>142</sup>.

Para una caracterización precisa se han incorporado los vidrios utilizados por la empresa a la IGDB, introduciendo los siguientes parámetros y convirtiendo las unidades al sistema internacional (SI) y a aquellas que especifica el programa:

Transmitancia solar; Reflectancia solar de la capa; reflectancia solar de la capa interior; Transmitancia visible; Reflectancia visible capa exterior Visible; Reflectancia visible capa interior; Transmitancia de infrarrojos de onda larga; emitancia de infrarrojos capa exterior onda larga; emitancia de infrarrojos capa interior onda larga; conductividad W/mK; parámetros del color en coordenadas RGB.

---

<sup>142</sup> Los valores nominales de transmisión, reflexión y absorción de la empresa están basados en la normativa EN-410, vidrio para la edificación. Determinación de las características luminosas y solares de los acristalamientos. El coeficiente U, ha sido calculado según la normativa UNE-EN-673, vidrio en la construcción: determinación del coeficiente de transmisión térmica, U. Método de cálculo.

A la hora de introducir los datos de color, se ha tenido que hacer una conversión de parámetros, pasando las coordenadas de color L\*a \*b (CIELAB COLOR SPACE o CIE 1976) a coordenadas RGB<sup>143</sup>.

Una vez introducidos las características de los vidrios en la base de datos del programa, se procede a la conformación y generación de la composición de los vidrios mediante el programa. Para la simulación del vidrio plano flotado se ha utilizado el vidrio comercial de la casa Saint Gobain Glass, Planilux.

Los resultados se han comparado con los datos proporcionados por la empresa.

Tras la realización de dicha tabla obtenemos como resultado que los valores obtenidos para los vidrios de control solar (TS-30 y SS-20) tanto del Window como del DB coinciden prácticamente con los de la empresa. Exactamente los valores del programa Window, coinciden entre un 98% y un 100% con los de la empresa, mientras que los del DesingBuilder, aunque trabaja con la misma base de datos del Window (International Glazing Data Base IGDB) coincide entre un 94.9% y un 96.6%. El programa Window se ha usado como comprobante de los datos, y se darán por válidos los valores del DesingBuilder por estar dentro del 95% de fiabilidad.

Por otro lado los valores obtenidos para los vidrios bajo emisivos (DAG-30, SUPER-E, AN-62) tanto del Window como del DB coinciden prácticamente con los de la empresa. Más concretamente los valores del programa Window, coinciden entre un 94.1% y un 98.8% con los de la empresa, mientras que los del DesingBuilder, aunque trabaja con la misma base de datos del Window (International Glazing Data Base IGDB) coincide entre un 98.6% y un 102%. El programa Window se ha usado como comprobante de los datos, y se darán por válidos los valores del DesingBuilder por estar dentro del 95% de fiabilidad.

Tabla 6-VII. Datos comparativos obtenidos de la Empresa Ariño comparados con los obtenidos con Window.

TABLA DE COMPARACIÓN DE VIDRIOS					
Nombre de vidrio	Procedencia de los Datos	Composición	Valor U W/m <sup>2</sup> K	Tv (tanto por uno)	g (factor solar) (tanto por uno)
SS-20. Control solar cara 2	Empresa	6/12/6, compuesto por vidrio incoloro y capa metálica control solar SS-20, y cámara de aire 100% puro.	2.6	0.18	0.22
	Window 5.217		2.60	0.18	0.27
	DesignBuilder		2.514	0.18	0.243
TS-30.	Empresa	6/12/6, compuesto por vidrio	2.7	0.28	0.29

<sup>143</sup> Más información sobre la conversión de parámetros en Anexo 3: metodología de simulación: conversión de colores L\*a\*b vs RGB.

<b>Control solar cara 2</b>	Window 5.217	incolore y capa metálica control solar TS-30, y cámara de aire 100% puro.	2.65	0.28	0.348
	DesingBuilder		2.563	0.278	0.31
<b>Doble vidrio</b>	Empresa	6/8/6, compuesto por doble vidrio incolore y cámara de aire 100% puro.	3.03	0.79	0.72
	Window 5.217		3.0331	0.789	0.726
	DesignBuilder		2.898	0.787	0.719
<b>SUPER E. Bajo emisivo cara 2</b>	Empresa	6/12/6, compuesto por vidrio incolore y capa metálica bajo emisiva Super-E, y cámara de aire 100% puro.	1.7	0.73	0.56
	Window 5.217		1.68	0.73	0.57
	DesignBuilder		1.735	0.729	0.56
<b>SUPER E. Bajo emisivo cara 3</b>	Empresa		-	-	-
	Window 5.217		1.68	0.73	0.63
	DesignBuilder		1.735	0.729	0.61
<b>AN-62. Bajo emisivo cara 2</b>	Empresa	6/12/6, compuesto por vidrio incolore y capa metálica bajo emisiva AN-62, y cámara de aire 100% puro.	1.7	0.62	0.43
	Window 5.217		1.60	0.62	0.44
	DesignBuilder		1.677	0.617	0.43
<b>AN-62. Bajo emisivo cara 3</b>	Empresa		-	-	-
	Window 5.217		1.603	0.62	0.56
	DesignBuilder		1.687	0.617	0.51
<b>DAG-30. Bajo emisivo cara 2</b>	Empresa	6/12/6, compuesto por vidrio incolore y capa metálica bajo emisiva DAG-30, y cámara de aire 100% puro.	1.6	0.27	0.18
	Window 5.217		1.55	0.27	0.20
	DesignBuilder		1.636	0.273	0.18
<b>DAG-30. Bajo emisivo cara 3</b>	Empresa		-	-	-
	Window 5.217		1.55	0.27	0.47
	DesignBuilder		1.636	0.273	0.37

Una vez introducidos todos los datos, realizamos la simulación, a partir de las siguientes hipótesis de partida:

- Actividad
  - o Ocupación: 0.001.
  - o Termostato. No se tiene en cuenta, puesto que el sistema de climatización se considera como apagado.
- Iluminación: No se considera.
- HVAC (elección del tipo de climatizador). No se considera.

#### **6.7.2. CICLO DE SIMULACIONES**

En este punto del capítulo se van a simular dos vidrios de control solar (TS-30 y SS-20) y tres de baja emisividad,(DAG-30, AN-62 y SUPER-E) como representantes genéricos de los vidrios comerciales disponibles, según recomendaciones de un fabricante nacional. Igualmente se debe señalar que no ha sido posible simular vidrios dinámicos ya que el programa no lo ha permitido, especialmente los vidrios con cámara de agua.

Para realizar el ciclo de simulaciones se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Con objeto de hacer posteriores comparaciones con el ciclo de ensayos es de vital importancia ajustar al máximo el modelo para que se comporte de la manera más parecida posible al ensayo. Para ello se realizarán una serie de tanteos con la finalidad de descubrir cuanto antes posibles distorsiones o incongruencias y poder corregirlas a tiempo en el modelo. Factores como la temperatura exterior, el aislamiento de la caja y los parámetros del vidrio a estudiar son especialmente críticos.
- Debido a que es imposible a priori simular el vidrio con agua circulante en la cámara todas las comparaciones se harán en base al comportamiento del vidrio patrón. Por ello es de capital importancia que las simulaciones imiten del modo más fiel posible el comportamiento del vidrio patrón, cuyos parámetros de comportamiento (g, U, etc.) son datos de partida inamovibles.
- Para poder estimar la mejora en las prestaciones energéticas que proporciona un vidrio con agua circulante tanto en pérdidas como en ganancias es necesario compararlo con los vidrios estáticos de mejores prestaciones en los dos campos: bajo emisivos y control solar. Por este motivo es esencial cuantificar mediante simulación y ensayo sus prestaciones con respecto al vidrio patrón. Estas simulaciones proporcionan una rápida interpretación del fenómeno que acontece en el ensayo lo que permite la adquisición de un conocimiento más amplio en todo tipo de condiciones. Con objeto de aumentar la confianza en los resultados de la simulación es esencial compararlas con ensayos reales, para estimar la

precisión de los resultados procedentes de la simulación y proponer en su caso coeficientes de corrección.

- Es importante señalar que los programas de simulación energética disponibles no han sido elaborados con el propósito específico de reproducir exactamente unas condiciones reales de ensayo sino para estimar con promedios más o menos aproximados el comportamiento energético de un edificio, durante periodos calendarios extensos.
- Con el objeto de hacer simulaciones que se puedan comparar con ensayos en días cercanos a los solsticios, se han elegido los días más parecidos de calendario en la simulación, con objeto de que se puedan reproducir unas condiciones meteorológicas lo más parecidas posibles a la de los ensayos. Aunque de un modo secundario se han intentado reproducir a posteriori los días del ensayo (temperatura, humedad, radiación...) el programa incorpora algoritmos aleatorios que quedan fuera del control del usuario, no habiendo sido posible su investigación. No es propósito de esta tesis adentrarse más en los algoritmos ocultos del programa. Por ello cada tanto es necesario jugar con las fechas para obtener un día con las condiciones adecuadas, es decir, lo más parecido a los elegidos para los ensayos (temperatura y radiación solar similares).
- Los días nublados han sido descartados a favor de los días completamente despejados. Igualmente se ha de destacar que por cada simulación que aparece reflejada fácilmente se han hecho diez, que por cuestión de espacio, lógicamente no se incluyen.

#### **6.7.2.1. SIMULACIONES A CAPTACIÓN**

En primer lugar se han realizado simulaciones a captación con un modelo que reproducía las cajas con el aislamiento inicial. Dado que durante la elaboración de la tesis han corrido con mayor o menor simultaneidad los ciclos de simulación y ensayos, por imperativos del tiempo meteorológico, ha sido posible contrastar las simulaciones con ensayos reales y sus modificaciones. Por ello cuando se decidió aumentar el aislamiento de las cajas de ensayo y se realizaron nuevamente ensayos a captación se observó que la simulación ajustaba mucho mejor el comportamiento del patrón cuando se comparaba con el modelo con aislamiento reforzado que con la inicial. Por este motivo las simulaciones a captación que se exponen a continuación están realizadas con el modelo con el aislamiento reforzado. (Ver 7.4 y 7.5).

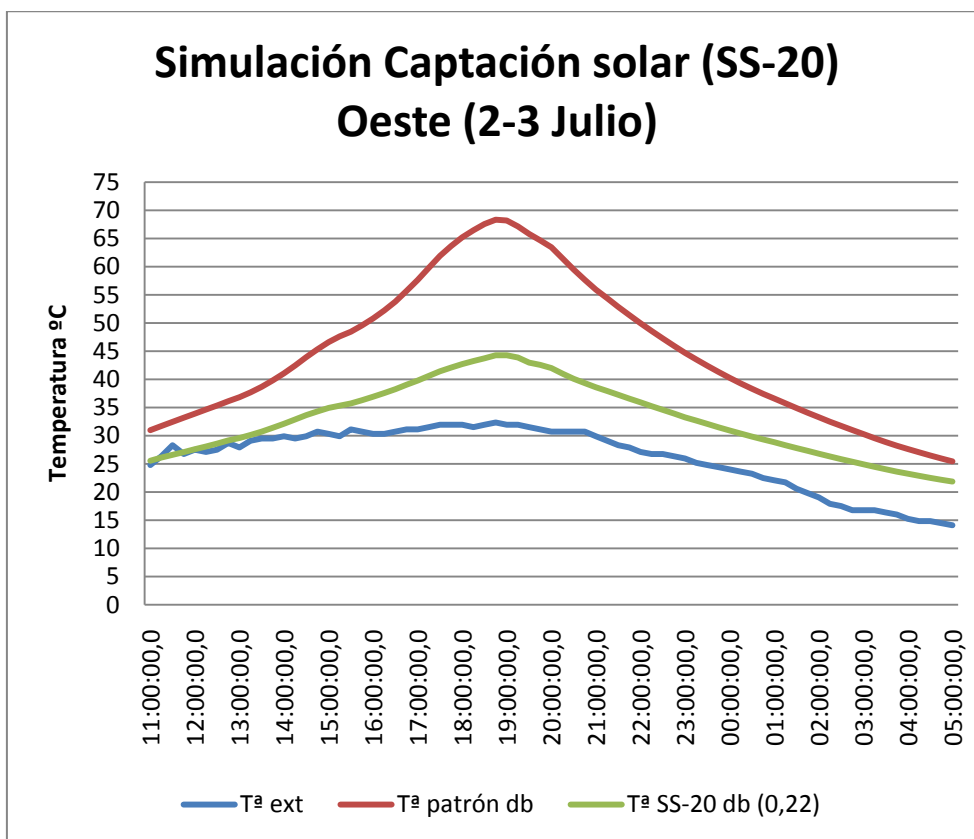
Todas las gráficas aquí expuestas y los valores numéricos se encuentran adjuntos en el Anexo 3: metodología de simulaciones. Ciclo de ensayos. Simulaciones: 1-4.

**E. ENSAYOS A OESTE**

**VIDRIO SS-20. SIMULACIÓN Nº1.**

Se trata de una simulación realizada los días 2-3 de Julio, para un vidrio de control solar SS-20, entre las 11:00 y las 5:00h en orientación oeste.

Se puede observar que mientras el vidrio patrón (6/8/6) (rojo) alcanza los 67°C de temperatura a las 19:00h, el vidrio de control solar SS-20 (verde) se queda en los 44°C, para un día soleado de verano de temperatura máxima de 33°C por el día y 15°C por la noche.

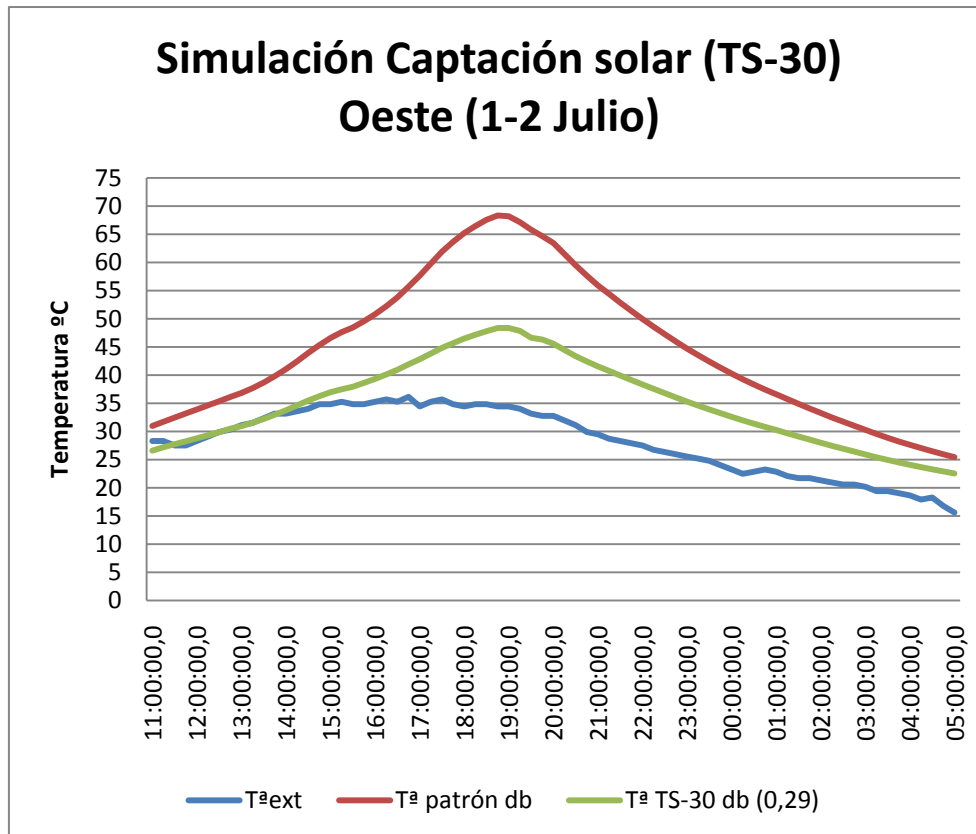




**VIDRIO TS-30. SIMULACIÓN Nº 2**

Se trata de una simulación realizada los días 1-2 de Julio, para un vidrio de control solar TS-30, entre las 11:00 y las 5:00h en orientación oeste.

Se puede observar que mientras el vidrio patrón (6/8/6) (rojo) alcanza los 68°C de temperatura a las 19:00h, el vidrio de control solar SS-20 (verde) se queda en los 49°C, para un día soleado de verano de temperatura máxima de 35°C por el día y 20°C por la noche.

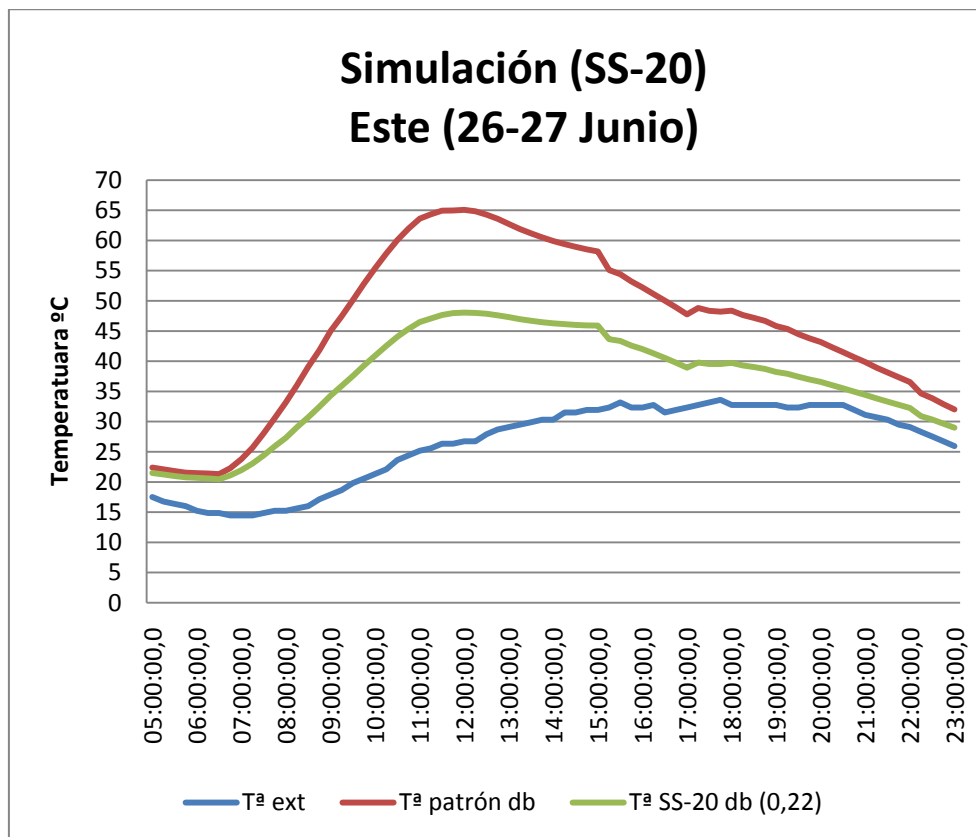


F. ENSAYOS A ESTE

VIDRIO SS-20. SIMULACIÓN Nº 3

Se trata de una simulación realizada los días 26-27 de Junio, para un vidrio de control solar SS-20, entre las 05:00 y las 23:00h en orientación este.

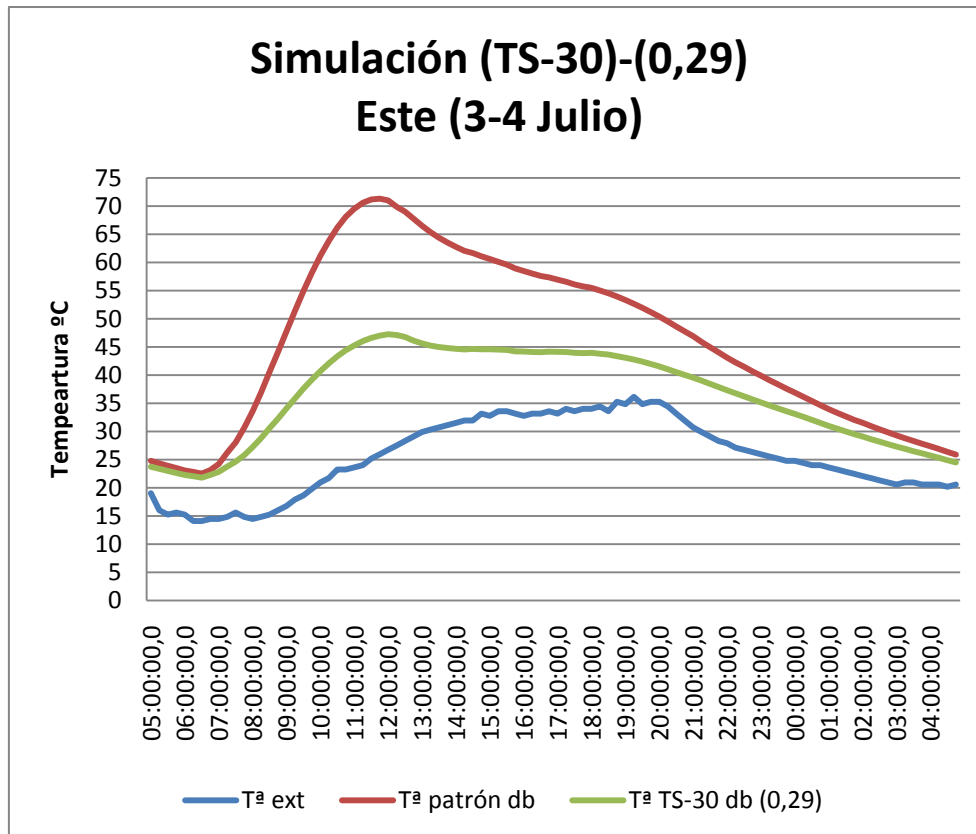
Se puede observar que mientras el vidrio patrón (6/8/6) (rojo) alcanza los 65°C de temperatura a las 11:00h, el vidrio de control solar SS-20 (verde) se queda en los 47°C, para un día soleado de verano de temperatura máxima de 28°C por el día y 15°C por la noche.



**VIDRIO TS-30. SIMULACIÓN Nº4**

Se trata de una simulación realizada los días 3-4 de Julio, para un vidrio de control solar TS-30, entre las 05:00 y las 23:00h en orientación este.

Se puede observar que mientras el vidrio patrón (6/8/6) (rojo) alcanza los 72°C de temperatura a las 11:00h, el vidrio de control solar SS-20 (verde) se queda en los 46°C, para un día soleado de verano de temperatura máxima de 30°C por el día y 15°C por la noche.



#### **6.7.2.2. SIMULACIONES A PÉRDIDAS**

La modelización del ensayo a pérdidas no ha permitido su reproducción exacta, debido principalmente a que no es factible reproducir la introducción de un objeto caliente, como es la probeta caliente de hormigón.

En el DesignBuilder, ha sido imposible la modelización de una probeta de hormigón en el centro de la caja de ensayo, tal y como la teníamos prevista. Para ello, se ha introducido como masa térmica interna de material hormigón y con un área de exposición aproximada de  $0.11\text{m}^2$ .

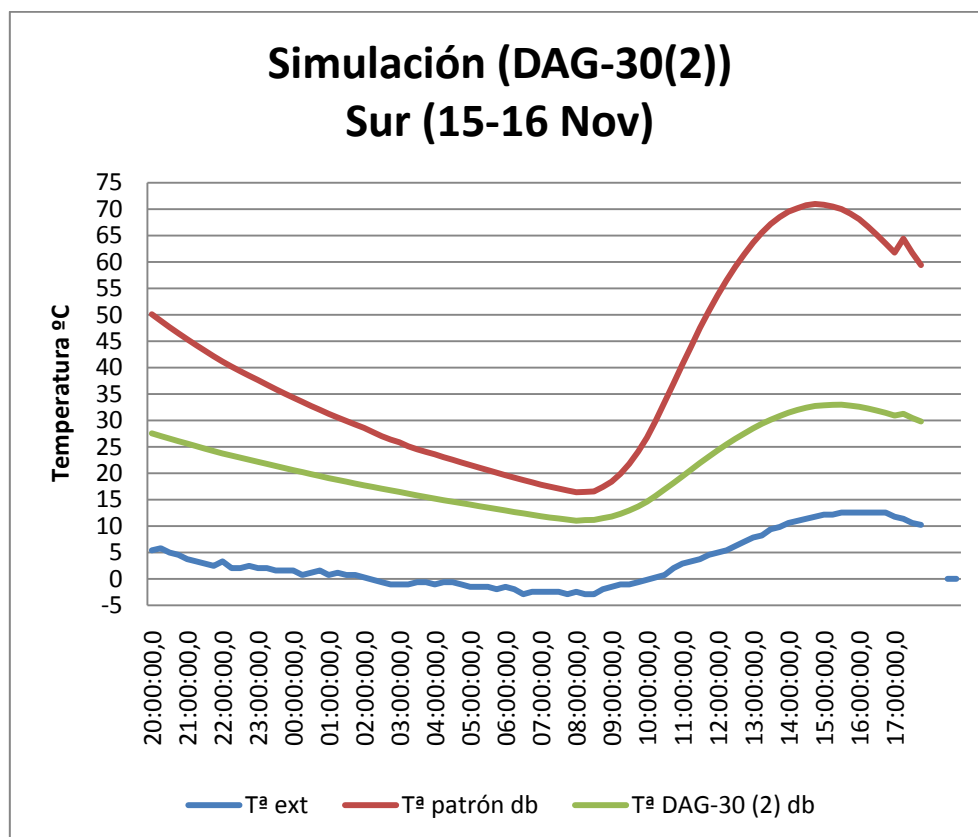
Todas las gráficas aquí expuestas y los valores numéricos se encuentran adjuntos en el Anexo 3: metodología de simulaciones. Ciclo de ensayos. Simulaciones: 5-10.

## G. ENSAYOS A SUR

## DAG30 CARA 2. SIMULACIÓN Nº 5.

Se trata de una simulación realizada los días 15-16 de Noviembre, para un vidrio bajo emisorio DAG-30 situado en cara 2, entre las 20:00 y las 17:00h en orientación sur.

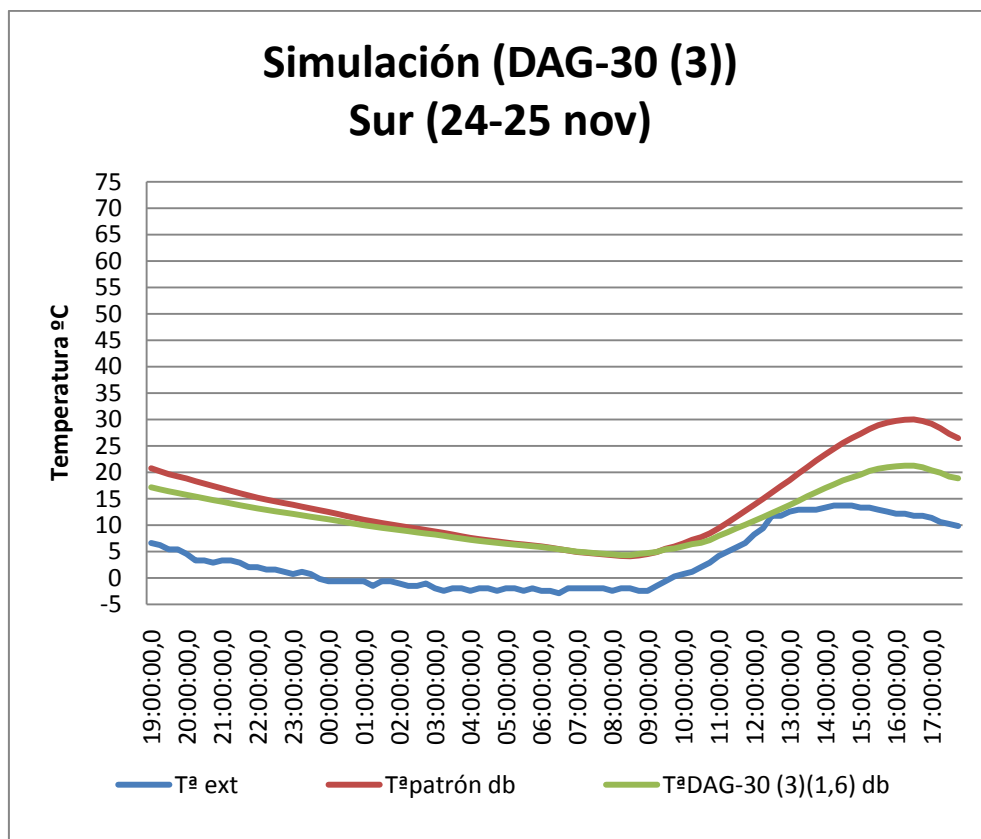
Se puede observar un leve mejor comportamiento a pérdidas del vidrio bajo emisorio (verde), frente a un vidrio patrón 6/8/6 (rojo). Con respecto a captación se puede ver que mientras el vidrio patrón alcanza los 71°C a las 15:00 el vidrio bajo emisorio alcanza los 33°C, para una temperatura exterior típica de finales de otoño que oscila entre los -3°C por la noche y los 13°C durante el día.



**DAG-30 CARA 3. SIMULACIÓN Nº 6**

Se trata de una simulación realizada los días 25-26 de Noviembre, para un vidrio bajo emisorivo DAG-30 situado en cara 3, entre las 20:00 y las 17:00h en orientación sur.

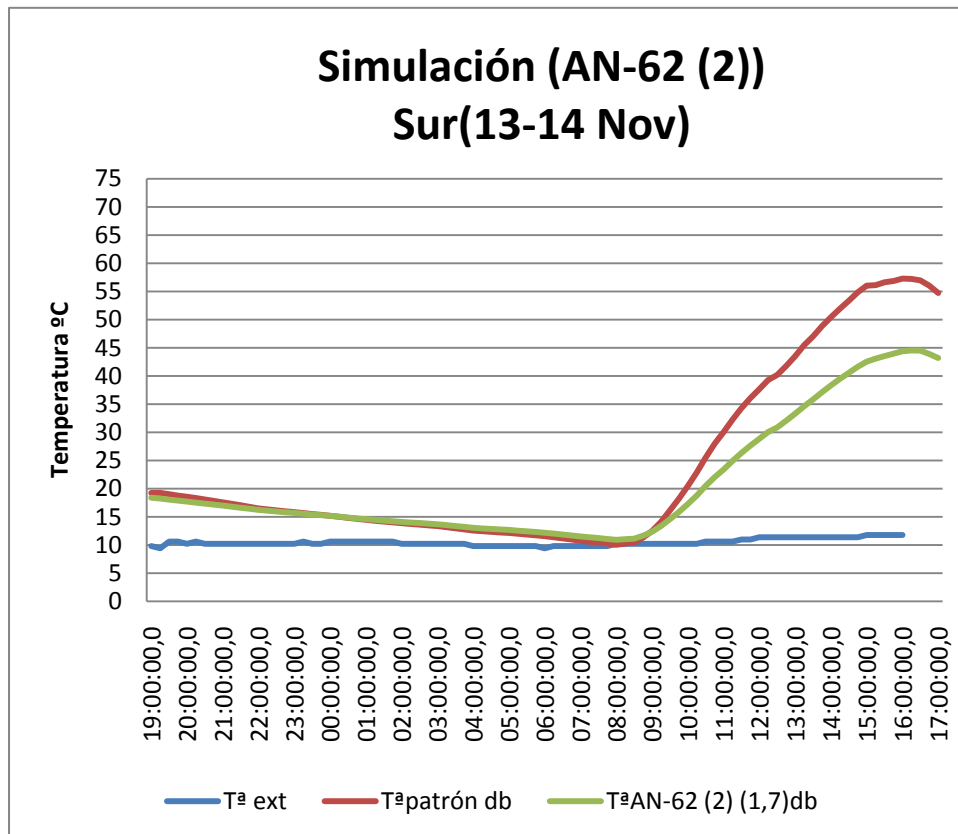
Se puede observar un leve mejor comportamiento a pérdidas del vidrio bajo emisorivo (verde), frente a un vidrio patrón 6/8/6 (rojo). Con respecto a captación se puede ver que mientras el vidrio patrón alcanza los 30°C a las 16:00 el vidrio bajo emisorivo alcanza los 22°C, para una temperatura exterior típica de finales de otoño que oscila entre los -3°C por la noche y los 7°C durante el día. El día estaba parcialmente nublado.



**AN-62 CARA 2, SIMULACIÓN Nº 7**

Se trata de una simulación realizada los días 25-26 de Noviembre, para un vidrio bajo emisivo AN-62 situado en cara 2, entre las 19:00 y las 17:00h en orientación sur.

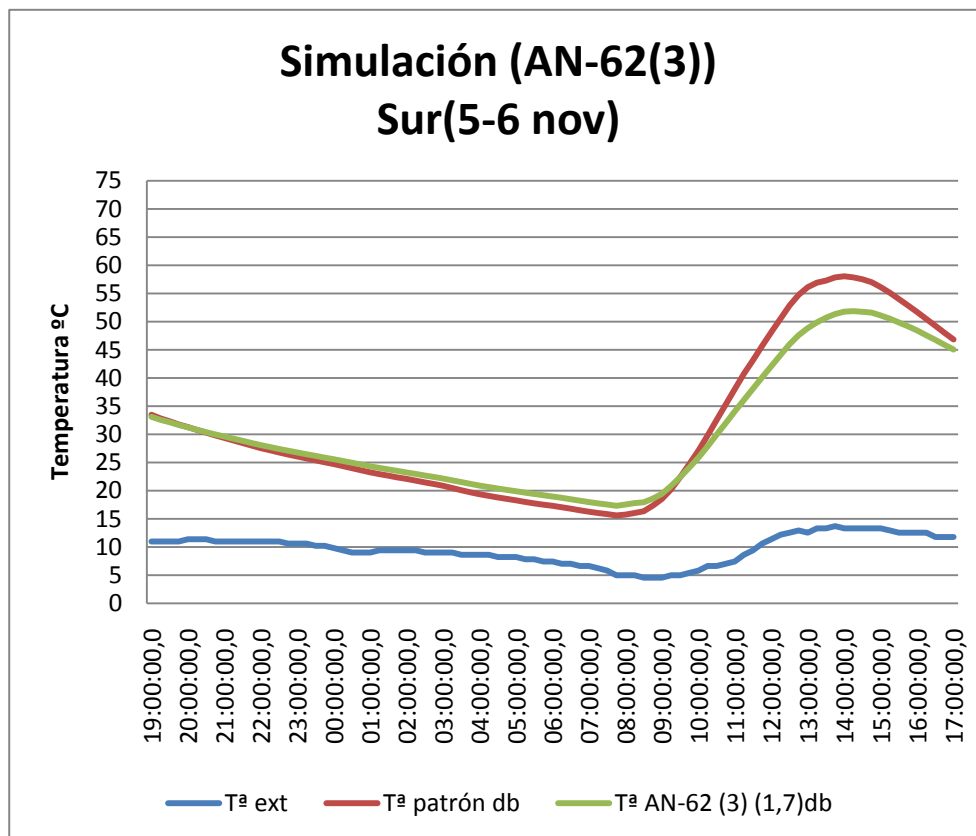
Se puede observar un comportamiento muy parecido a pérdidas del vidrio bajo emisivo (verde), frente a un vidrio patrón 6/8/6 (rojo). Con respecto a captación se puede ver que mientras el vidrio patrón alcanza los 57°C a las 16:00 el vidrio bajo emisivo alcanza los 45°C, para una temperatura exterior típica de finales de otoño a temperatura constante de unos 10°C.



**AN-62 CARA 3. SIMULACIÓN Nº 8**

Se trata de una simulación realizada los días 25-26 de Noviembre, para un vidrio bajo emisivo AN-62 situado en cara 3, entre las 19:00 y las 17:00h en orientación sur.

Se puede observar un muy leve mejor comportamiento a pérdidas del vidrio bajo emisivo (verde), frente a un vidrio patrón 6/8/6 (rojo). Con respecto a captación se puede ver que mientras el vidrio patrón alcanza los 56°C a las 14:00 el vidrio bajo emisivo alcanza los 57°C, para una temperatura exterior típica de finales de otoño que oscila entre los 10°C y los 5°C.

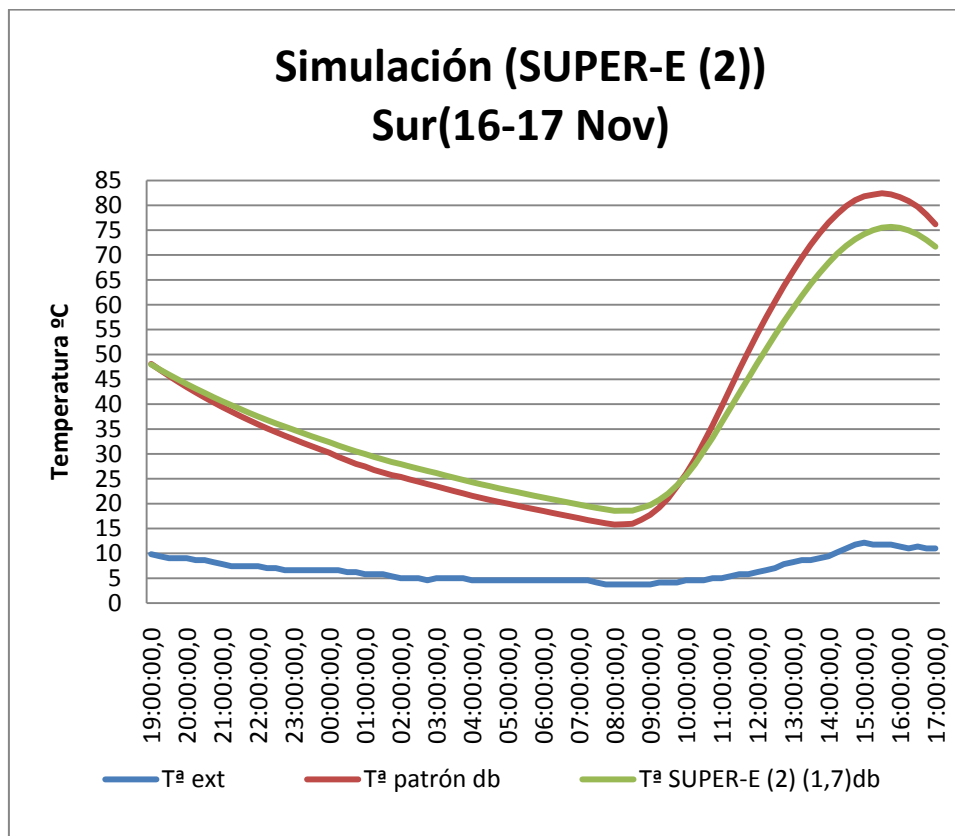




**SUPER E CARA 2. SIMULACIÓN Nº 9**

Se trata de una simulación realizada los días 16-17 de Noviembre, para un vidrio bajo emisivo SUPER-E situado en cara 2, entre las 19:00 y las 17:00h en orientación sur.

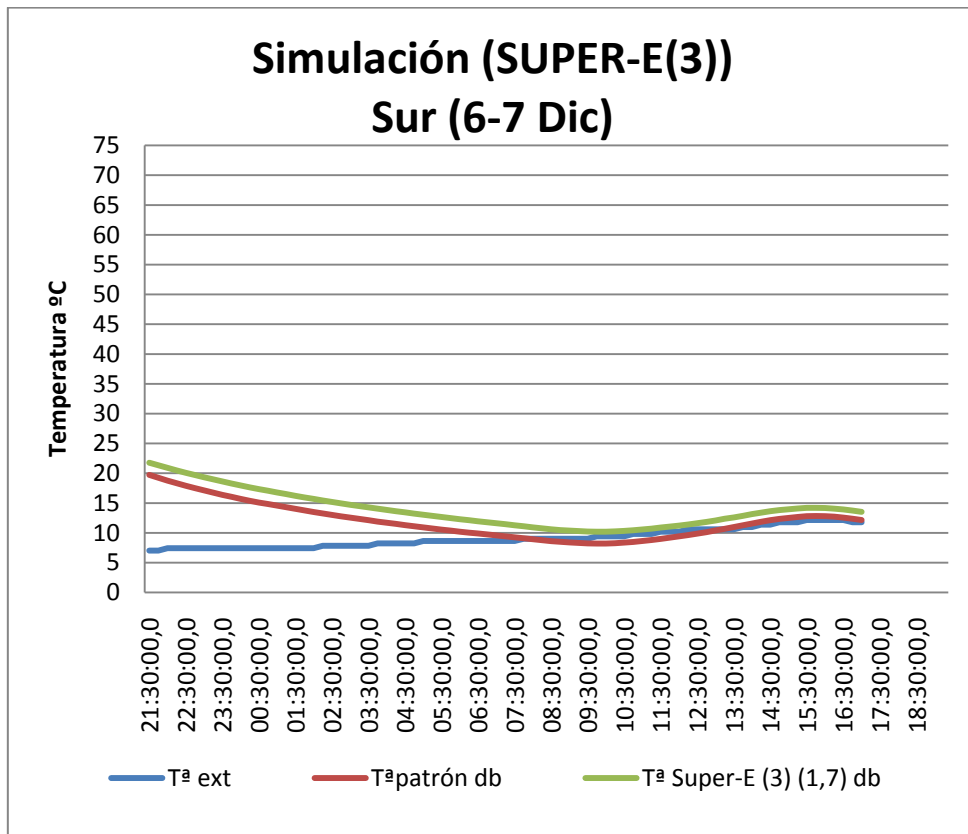
Se puede observar un mejor comportamiento a pérdidas del vidrio bajo emisivo (verde), frente a un vidrio patrón 6/8/6 (rojo). Con respecto a captación se puede ver que mientras el vidrio patrón alcanza los 82°C a las 15:00 el vidrio bajo emisivo alcanza los 75°C, para una temperatura exterior típica de finales de otoño que oscila entre los 10°C durante el día y los 5°C por la noche.



**SUPER E CARA 3. SIMULACIÓN Nº 10**

Se trata de una simulación realizada los días 6-7 de Diciembre, para un vidrio bajo emisor SUPER-E situado en cara 3, entre las 21:30 y las 18:30h en orientación sur.

Se puede observar un comportamiento muy parecido a pérdidas del vidrio bajo emisor (verde), frente a un vidrio patrón 6/8/6 (rojo). Con respecto a captación ambos vidrios se comportan de un modo muy parecido, para una temperatura exterior típica de finales de otoño que oscila entre los 7 y los 12°C, en un día nublado.



## 6.8. CONCLUSIONES PARCIALES

- Se han analizado y utilizado diversos programas informáticos, destacando los siguientes: dos programas de simulación energética, Ecotect y DesignBuilder, y dos programas de apoyo a la simulación, destacando los programas de Window y Therm.
- El programa Window es un programa altamente válido y útil para la caracterización de los parámetros ópticos y térmico de cualquier vidrio estático y dinámico, estableciendo los vidrios dinámicos como una serie de vidrios estáticos (activo, inactivo, y fases intermedias) en los que se cambian los parámetros de: Reflectancia y transmitancia tanto solar como visible, manteniéndose el resto de los parámetros.
- El programa Therm, Es un programa apropiado para un cálculo preciso del factor U entre otros valores, en cualquier punto que se estime necesario en un cerramiento o en una carpintería, y por tanto, la estimación de puentes térmicos. Este dato, es fácilmente introducible o comparable con el programa de simulación energética que se esté trabajando en el momento.
- Del programa Ecotect, se han encontrado diversas carencias. Es un programa, que en resumen puede ser utilizado en análisis lumínico (estudio completo de sombras incluyendo la carta estereográfica y estudio de iluminación natural en cualquier punto o plano). El análisis térmico, tiene diversos fallos en su cálculo, por lo que su uso sirve para cálculos generales como un precálculo o tener una idea. Está totalmente desaconsejado, en la simulación de vidrios, especialmente en análisis térmico, debiéndose utilizar el programa Window.
- Al comparar los resultados obtenidos por los programas Window y DesignBuilder, con los datos cedidos por la empresa, se pone de manifiesto que para vidrios de control solar el programa DesignBuilder coincide entre un 94.9% y un 96.6% con los datos de la empresa, mientras que el programa Window coinciden entre un 98% y un 100% con los mismos datos. Para vidrios bajo emisivos el programa Window coinciden entre un 94.1% y un 98.8% con los de la empresa mientras que el DesingBuilder, coincide entre un 98.6% y un 102%.

Por tanto, para vidrios con una baja transmitancia térmica (U) el DesingBuilder muestra un mejor comportamiento que el programa Window. Sin embargo, para vidrios con una mayor transmitancia térmica los resultados del programa Window muestran una mayor precisión. No obstante las variaciones son de pequeña magnitud y poco significativas, por lo que ambos programas pueden considerarse válidos, para la caracterización de vidrios.

El DesignBuilder, utilizado para el análisis de vidrios, tiene como ventaja que trabaja directamente con la base de datos IGDB, lo que permite reducir el uso del programa Window, utilizándose éste último solamente para ampliaciones de los parámetros ópticos.

- Aunque con una complejidad mayor que en el Ecotect, la modelización de la caja de ensayo, se dibujó directamente en el programa DesingBuilder. La caracterización de los materiales tanto opacos como transparentes que constituyen el método de ensayo, no supuso problema alguno, al contrario que con el Ecotect. Su caracterización era tan precisa como la del Window o el Therm.
- Se puede decir que el ensayo se ha modelizado sin problema alguno, aunque se encuentran puntos que han quedado sin resolver a la hora de obtener resultados coherentes en los casos siguientes:
  - Los datos climáticos IWEK o SWEC generados por Energyplus, no conlleva ningún problema asociado.
  - Los archivos climáticos reales procedentes del Energy Plus, para días reales<sup>144</sup>, procedentes de los siguientes fuentes: Weather Bank, National Climatic Data Center, Weather Source, pueden ser utilizadas directamente en el programa, pero deben insertarse los datos de radiación directa, difusa y global. Por otro lado se ha observado además un gran descuadre, tanto de las horas (al comparar las dos temperaturas exteriores en unas 8 horas debido seguramente a la falta de conversión de GMT a LST. (estaba especificado que podría ocurrir en estaciones según la pagina web de Energy Plus).
  - Si se insertan datos climáticos procedentes de alguna otra fuente, no mencionada anteriormente, por ejemplo AEMET, ofrece resultados no coherentes.
- Las aportaciones de las experiencias previas de simulación energética de edificios han sido determinantes en varios aspectos para esta tesis. En primer lugar para la selección del programa más adecuado, en segundo lugar para realizar una modelización correcta y eficaz del ensayo y de sus condiciones de ejecución. Finalmente, para comprender la influencia que tiene el proceso de simulación en el de proyecto y ejecución de un edificio y el interés que conlleva su correcto ajuste.

---

<sup>144</sup> [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata\\_download.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_download.cfm)

**INDICE      CAPÍTULO      7.      METODOLOGÍA  
EXPERIMENTAL: ANÁLISIS FÍSICOS**

<b>7. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL: ENSAYOS FÍSICOS .....</b>	<b>211</b>
7.1. ANTECEDENTES DE MÉTODOS DE ENSAYO EN CONDICIONES DE INTERIOR Y DE EXTERIOR.....	211
7.1.1. Metodología de ensayo de acristalamientos en interior.....	211
7.1.2. Metodología de ensayo de acristalamientos en exterior.....	213
7.2. MÉTODO DE ENSAYO .....	216
7.2.1. Ensayo propuesto. Justificación .....	216
7.2.2. Descripción de la cámara de ensayo .....	218
7.2.3. Instrumentos de medida. ....	220
7.2.4. Procedimiento operativo del ensayo .....	221
7.2.5. Lectura de resultados. ....	223
7.3. CONDICIONANTES DEL ENSAYO. ....	224
7.3.1. Condicionantes atmosféricas reales .....	224
7.3.2. Fechas de ensayo y orientaciones.....	225
7.3.3. Descripción de los ensayos de captación.....	225
7.3.4. Descripción de los ensayos a pérdidas.....	226
7.3.5. Influencia de las inclemencias meteorológicas .....	227
7.4. MODIFICACIONES DEL ENSAYO.....	228
7.4.1. Modificaciones reales del ensayo para mejorar sus prestaciones .....	228
7.5. ENSAYOS ESPECIALES PARA VIDRIOS CON AGUA .....	234
7.5.1. Funcionamiento del ensayo a captación .....	236
7.5.2. Funcionamiento del ensayo a pérdidas .....	242
7.6. CICLO DE ENSAYOS .....	251
7.6.1. Ensayos a captación .....	252
7.6.1.1. Ensayos a oeste. Vidrios de control solar .....	254
7.6.1.2. Ensayos a este. Vidrios convencionales.....	256
7.6.2. Vidrios con cámara de agua.....	260
7.6.3. Ensayos a pérdidas .....	270

7.6.3.1. Ensayos a pérdidas vidrios bajo-emisivos.....	271
7.6.4. Vidrios con cámara de agua.....	277
7.7. CONCLUSIONES PARCIALES:.....	291
7.7.1. Ensayos a captación.....	291
7.7.2. Ensayos a pérdidas .....	291
7.7.3. Vidrios con cámara de agua.....	291

## 7. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL: ENSAYOS FÍSICOS

### 7.1. ANTECEDENTES DE MÉTODOS DE ENSAYO EN CONDICIONES DE INTERIOR Y DE EXTERIOR.

Hasta el momento, diversos investigadores han desarrollado métodos de ensayo con el fin de evaluar las ganancias y pérdidas térmicas de materiales, y más concretamente en el campo de la medición de la eficiencia energética de los acristalamientos, donde se sitúa nuestra investigación. En este contexto resulta muy interesante citar a Grimmer(1978)<sup>145</sup>, que hacia 1970 afirma que pequeñas cajas de ensayos pueden ser una herramienta muy útil para la modelización térmica de edificios. Grimmer sostiene que ya que las cargas térmicas pueden ser normalizadas al área de la superficie acristalada, es posible por tanto construir modelos físicos a escala del diseño de un edificio, caracterizando los parámetros térmicos del acristalamiento de la fachada sur. Pequeñas cajas de ensayo pueden ser construidas como modelos térmicos analizables, física y mediante ordenador. Del mismo modo concluye que estos modelos térmicos no se asemejan a un modelo arquitectónico a escala, sino que será construido de un modo similar al comportamiento de un modelo térmico equivalente al edificio real. La caja de ensayo a la que hace mención es de 58.4 cm de alto por 40.6 cm de ancho, toda ella opaca compuesta por 10.2 cm de aislamiento y con un U de 0.45<sup>146</sup>. Dicha cámara, se ha tomado como referencia para nuestro ensayo, aunque se van a describir a continuación diversos métodos encontrados distinguiendo entre condiciones de laboratorio y de intemperie.

#### 7.1.1. METODOLOGÍA DE ENSAYO DE ACRISTALAMIENTOS EN CONDICIONES DE INTERIOR

Investigadores del (Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Méjico), entre ellos G. Álvarez, M.J. Palacios, y J.J. Flores (1999)<sup>147</sup>, han desarrollado un método de ensayo para estimar el rendimiento térmico de las ventanas acristaladas. Proponen un procedimiento de ensayo que tiene lugar en condiciones de laboratorio y permite comparar cualquier composición de acristalamiento.

Para simular las condiciones de un recinto interior se emplea una caja de dimensiones 50x50x50 cm, con cerramiento acrílico aislado exteriormente, a excepción de la cara abierta donde se inserta el vidrio a ensayar, en un marco realizado con el mismo material. La radiación solar exterior incidente sobre el acristalamiento se simula con una lámpara halógena de 1000 W de potencia, que es calibrada hasta obtener una cantidad de energía radiante de  $900 \pm 5,6$  W/m<sup>2</sup>. Las siguientes imágenes muestran esquemas del método de ensayo.

<sup>145</sup> (Grimmer, McFarland, & Balcomb, 1979)

<sup>146</sup> Para más información sobre el ensayo ver anexo 1: artículos

<sup>147</sup> (Alvarez, Palacios, & Flores, 2000)

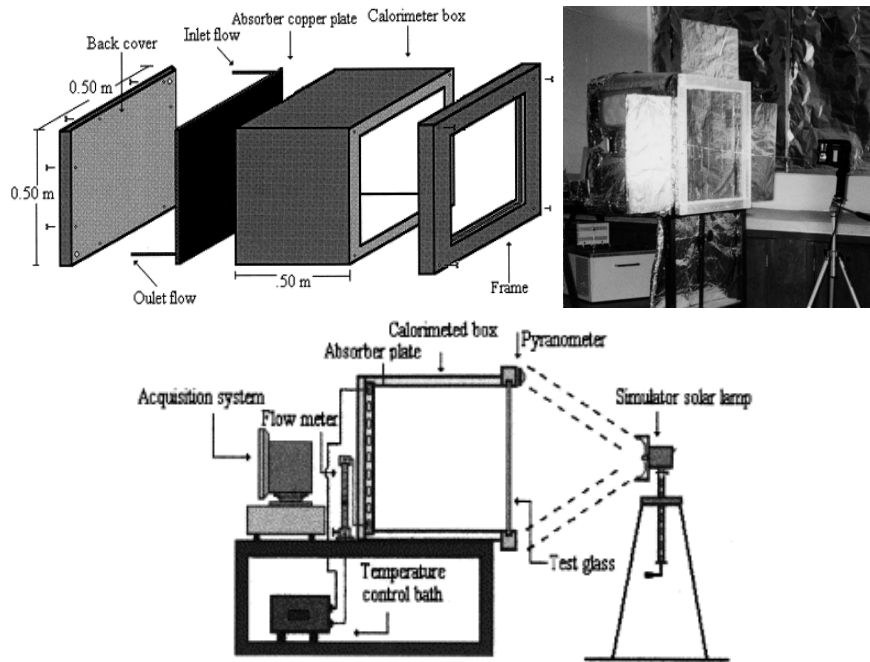


Fig. 7-1. Esquemas y fotografía del funcionamiento de la caja de ensayo.  
Fuente: Álvarez G. (1999).

En la parte trasera de la caja de ensayo se incorpora un dispositivo intercambiador de calor que mantiene la caja de ensayo a temperatura constante, formado por una placa de cobre y un serpentín a través del cual circula agua con un caudal constante. Tanto las ganancias térmicas como las pérdidas a través del vidrio se determinan por balance energético, calculando la cantidad de energía extraída o aportada a la caja por el dispositivo intercambiador de calor.

El intercambio de energía entre interior y exterior, fundamentalmente tiene lugar a través del vidrio, aunque existe una pequeña pérdida de calor a través de los mismos, que es considerada en el cálculo mediante la determinación del coeficiente global de transmisión de la caja.

Se trata de un método de ensayo a escala pero en condiciones de interior, capaz de evaluar las características térmicas de determinados tipos de vidrio. Aunque se trata de un método exacto, resulta bastante complejo.

Además en condiciones de interior no se evalúa el comportamiento real del vidrio bajo los condicionantes climáticos reales: variación de la radiación solar diaria y a lo largo de las distintas estaciones.

Mediante este método de ensayo han ensayado 4 vidrios estáticos, según el artículo estudiado: vidrio plano flotado de 3 y 6mm, un vidrio filtrasol (vidrio espejo de Vitro Cristalglass) y un reflectasol (vidrio reflectante de Vitro Cristalglass), calculando el calor radiante a través de dichos vidrios (calor eliminado; pérdida de calor; entrada neta de calor; eficiencia térmica de la ventana y coeficiente de sombra.

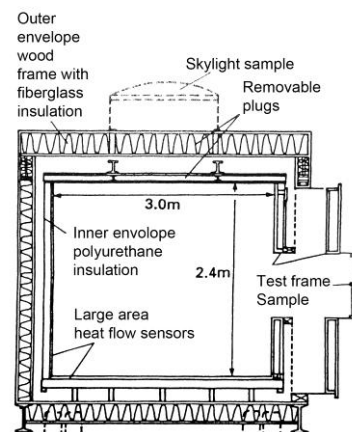


### 7.1.2. METODOLOGÍA DE ENSAYO DE ACRISTALAMIENTOS EN CONDICIONES DE EXTERIOR.

Las propiedades de un acristalamiento, en términos de comportamiento energético, vienen determinadas por el coeficiente de transmisión térmica (U), y el factor de ganancia solar (g). Estos valores, al contrario de lo que suele considerarse en los programas de simulación energética, no son constantes, sino que son valores variables y dependen en parte de las condiciones ambientales de exterior. Con este enfoque los laboratorios LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) de la Universidad de California, EEUU, desarrollaron hacia 1990 un sistema móvil para la experimentación en condiciones de exterior de acristalamientos avanzados denominado MoWiTT (Mobile Window Thermal Test)<sup>148</sup>, con el objetivo de poder realizar mediciones exactas del comportamiento térmico variable en el tiempo de diferentes acristalamientos, cuándo éstos son expuestos a condiciones climáticas reales.

El sistema MoWitt está formado por una plataforma móvil sobre la que se disponen dos celdas de ensayo idénticas del tamaño real de un recinto interior, cada una de ellas de dimensiones 2,44 x 3,05 x 2,34 m, convenientemente aisladas, de forma que pueden realizarse estudios comparativos simultáneos de diferentes acristalamientos en cualquier orientación y localidad. Cada una de las cámaras está totalmente aislada mediante un cerramiento de madera con fibra de vidrio, y cámara de aire revestido con poliuretano.

La plataforma está equipada con un sistema de calefacción y de refrigeración que proporciona a las celdas la temperatura necesaria en cada ensayo. El sistema caracteriza el flujo de energía que atraviesa cada acristalamiento en función del tiempo, y toma medidas simultáneas en intervalos de 30 segundos de las temperaturas interior y exterior, determinando la cantidad de energía suministrada para mantener las celdas a temperatura constante, la cantidad de radiación solar exterior, y la velocidad del viento a las que las muestras de acristalamiento están expuestas.



<sup>148</sup> (Robinson & Littler, 1993)

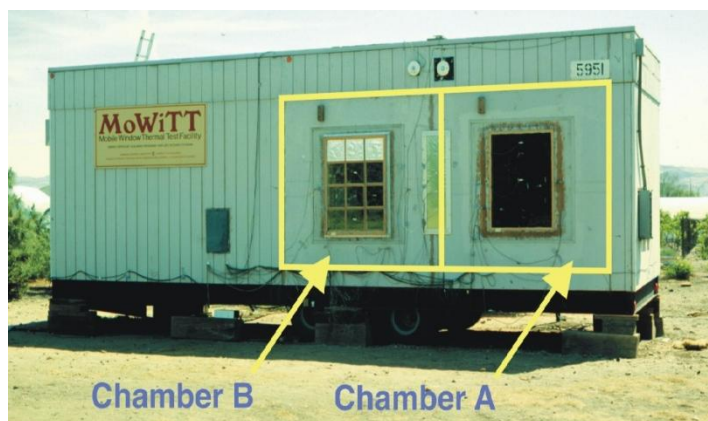


Fig. 7-2. Sistema MoWiTT (Mobile Window Thermal Test) para la experimentación de acristalamientos avanzados. Fuente: Lawrence Berkeley National Laboratory. <http://windows.lbl.gov/facilities/mowitt>

Según el LBNL<sup>149</sup>, MoWiTT plantea medir las siguientes características de las ventanas:

- *Proveer comparaciones directas de sistemas alternativos.*
- *Determinar el valor efectivo de U y el SHGC bajo condiciones reales.*
- *Proveer la verificación de cálculos de ahorros energéticos.*
- *Mediar el comportamiento energético de ventanas cuyos cálculos no están disponibles o son poco fiables.*

Ha realizado numerosos ensayos, entre los cuales destacamos un detallado estudio sobre los lucernarios con vidrios electrocrómicos realizado en 1999, estudio sobre condiciones previstas de valor U en vidrios bajos emisivos; medida de la carga energética de aire acondicionado en ventanas con venecianas controladas mediante el nivel de luz disponible; medida de características de ventanas con un complejo nivel de sombreadamiento; comportamiento energético de ventanas tipo invernadero.

En España, durante los años 2002 y 2003, se llevó a cabo una secuencia de ensayos para estimar el coeficiente de transmisión térmica y el factor de ganancia solar de un determinado acristalamiento (doble vidrio 4/20/4) en condiciones de exterior y bajo diferentes escenarios climáticos. La experimentación se realizó en la Plataforma Solar de Almería (PAS), gestionada directamente por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), mediante el empleo de una célula equipada con sistemas de acondicionamiento interior para el ensayo de elementos constructivos a escala real y bajo condiciones meteorológicas reales<sup>150</sup>.

La célula de ensayo, denominada PASSYS CELL, simula un recinto interior a escala real, de dimensiones 2.47x2.48m, con una abertura de 1.88m<sup>2</sup> de superficie, tal y como se muestra en la fotografía. El cerramiento está formado por un simple y uniforme panel sándwich de madera contrachapada y poliestireno de 20 cm de

<sup>149</sup> <http://windows.lbl.gov/facilities/mowitt/>

<sup>150</sup> (Jiménez, M.J., Porcar, B., Heras, M.R., 2008)

espesor, a excepción de la abertura preparada para la instalación del elemento a ensayar, de forma que sólo es posible el intercambio energético a través del mismo. En el estudio se realizaron varias series de ensayos, de una ventana formada por un doble acristalamiento 4/20/4 de 1.18x1.43 m<sup>2</sup>, con carpintería de madera, en condiciones de verano y en invierno, con la ventana orientada a Norte y orientada a Sur.

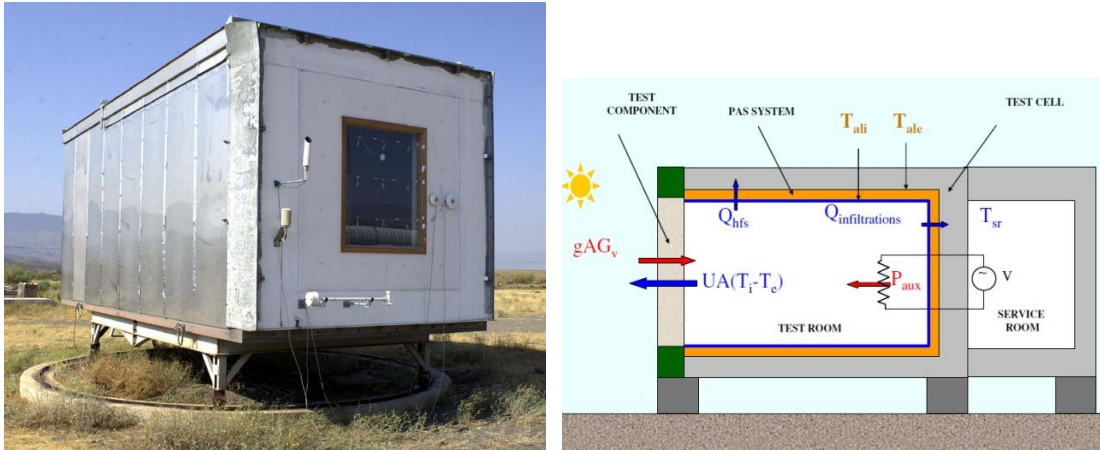


Fig. 7-3. Célula de ensayo Passys y diagrama de intercambio de calor. Fuente: Jiménez M.J. (2008).

La célula de ensayo está equipada con un revestimiento pseudo-adiabática, de modo que se impide el flujo de calor a través de la célula de ensayo, y el intercambio de calor se produce solo entre el recinto y el exterior a través del componente a ensayar.

El estudio realizado en la Plataforma Solar de Almería demuestra que los modelos de análisis no lineales, donde la radiación de longitud de onda larga no es considerada un efecto lineal, a la inversa de lo estimado en los métodos de ensayo en laboratorio, conforman un campo de estudio de mayor precisión para el cálculo del coeficiente de transmisión térmica por área de elemento y del factor de ganancia solar por área de elemento de un elemento constructivo.

En este caso, han ensayado distintos componentes sencillos, como es el caso de un doble vidrio.

Se trata de métodos de ensayos muy precisos en condiciones climáticas reales, transportables mediante el uso de plataformas especiales.

Con el mismo prototipo de ensayo se hicieron varios estudios en la localidad de Cottbus (Alemania) en el campus de Brandenburg Technical University (BTU) con un tamaño de 2.70x2.70x5.0m. La fachada está orientada a Sur y está equipado con 3 vidrios electrocrómicos de la casa Gesimat<sup>151</sup>, quien ha facilitado los documentos de los congresos y artículos publicados de los ensayos. Los vidrios tienen un tamaño de 1200x800mm. En el interior de la célula de ensayo, se instalaron sensores de iluminación a una altura de 0.85m y de temperatura.

<sup>151</sup> <http://www.gesimat.de/>.



Fig. 7-4. Célula de ensayo PASSYS. Fuente: M.Rottman (2007).

El ensayo realizado por M.Rottman (2007)<sup>152</sup> se basa en la Norma EN-ISO 7730. El calor producido por el metabolismo del cuerpo humano debería ser igual a la cantidad de calor desprendido. Es la que llama: Ecuación del confort, la cual describe la conexión entre los parámetros físicos medibles y la sensación térmica experimentada por cada persona. Estos parámetros son principalmente: temperatura del aire, temperatura global, velocidad del aire y humedad. Los rangos de iluminación fueron ajustados de 600 luxes a 630 lx. Los resultados muestran que mientras con vidrios normales la temperatura global llega hasta 35°C, con vidrios convencionales, se logra una reducción de hasta 26°C. El porcentaje de gente no satisfecha con vidrios electrocrómicos después del ensayo es de un 13%, mucho más bajo que con vidrios convencionales (un 50%).

Los artículos aquí reseñados se han incluido en el Anexo 1: Artículos.

## 7.2. MÉTODO DE ENSAYO

Se trata de un método de ensayo consistente en la evaluación de las ganancias y pérdidas térmicas que proporcionan diferentes elementos ligeros de cerramiento, entre ellos el vidrio. Servirá para medir las ganancias térmicas y las pérdidas con acristalamiento sencillo, doble y una cámara ventilada o hermética.

### 7.2.1. ENSAYO PROPUESTO. JUSTIFICACIÓN

A partir del conocimiento adquirido sobre métodos de ensayo y partiendo de los medios disponibles en el Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la ETSAM, se ha visualizado la viabilidad de la realización de ensayos físicos según los siguientes criterios:

- Simplificación del ensayo eliminando el sistema de climatización.
- Exposición en condiciones reales de intemperie en la terraza de la ETSAM.
- Medición con dataloggers para realización de la curva de temperatura interior y exterior.

---

<sup>152</sup>(Rottmann et al., 2007).

- Comparación constante con un vidrio patrón.
- Utilización de medios sencillos de calentamiento nocturno de la cámara: probetas gemelas de hormigón calentadas durante 24h en un horno del laboratorio de materiales de la ETSAM.
- Es transportable y orientable mediante dos personas sin medios o maquinarias especiales.

La reducción de costes en la investigación es un objetivo permanente y deseable. Con ello se logra obtener más conocimiento con medios más reducidos. Es decir, se optimizan los medios estableciendo una mejora de la relación costes versus resultados. En este sentido la utilización de cámaras de tamaño reducido que por una parte ya han demostrado su interés y por el otro permiten hacer comparaciones con el patrón, es un argumento incuestionable de reducción de costes.

Por otra parte a pesar de lo sacrificado de su ejecución, por su dependencia constante de los cambios meteorológicos, se ha considerado conveniente el trabajar en condiciones reales de intemperie, ya que el sol se mueve constantemente, lo que no puede ser bien simulado con una lámpara de laboratorio, de modo que los resultados obtenidos son más fiables con respecto a cómo se comportará luego dicho producto en la realidad.

La metodología del datalogger permite visualizar las temperaturas que se alcanzan en el interior de las cámaras, permitiendo observar con claridad el fenómeno, en concreto la captación energética y su distribución a lo largo del día en cada orientación. La temperatura es un dato con el que trabaja un termostato en la realidad a la hora de activar o desactivar el sistema de climatización. Sin embargo, con un sistema de climatización, mantiene una temperatura constante donde no se visualiza lo que ocurre. Por tanto la imagen de la temperatura es más directa.

La comparación con un patrón es conveniente ya que trabajando simultáneamente bajo las mismas condiciones climáticas se observa con claridad la diferencia de comportamiento entre unos tipos de vidrios y otros.

Al haber eliminado del ensayo cualquier sistema de climatización, se ha optado por la utilización de probetas de hormigón gemelas precalentadas en un horno previamente, a la misma temperatura. Esto garantiza una aportación idéntica de energía calorífica inicial a ambas cajas en el comienzo de los ensayos correspondientes, a saber, de pérdidas nocturnas.

La siguiente imagen muestra los comienzos del ensayo.



Fig. 7-5. Ensayo preliminar. Fuente: archivo propio.

### 7.2.2. DESCRIPCIÓN DE LA CÁMARA DE ENSAYO

El procedimiento de ensayo se está realizando mediante unas cajas de dimensiones 60x60x60 interiores, abierta por una de sus caras, en madera contrachapada de 10 mm anti-humedad, barnizada convenientemente la parte que queda a la intemperie, aislada al exterior con 4 centímetros de poliuretano y aislamiento térmico reflectivo, excepto la cara acristalada.

En la cara abierta (acristalada) se irán ensayando las distintas composiciones de vidrio. En la imagen adjunta, se puede observar tanto las cajas de ensayo realizadas como el lugar de realización de los mismos.

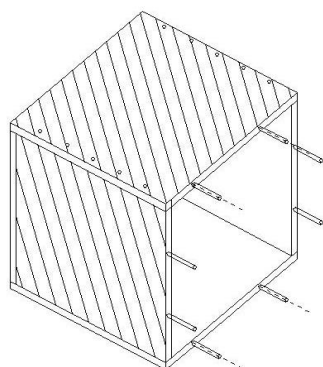


Fig. 7-6. Axonometría caja de ensayo.

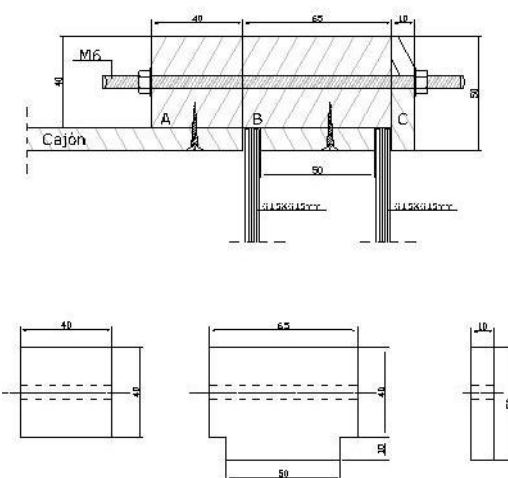


Fig. 7-7. Detalles constructivos de la caja.

La composición de la caja se incluye en la siguiente tabla:

Tabla 7-I. Tabla características materiales introducidos en el programa Therm. Fuente: realización propia

NOMBRE	CONDUCTIVIDAD W/m-K	EMISIVIDAD	ESPESOR mm
Contrachapado de madera	0.09	0.90	12
Aislamiento térmico de Poliestireno extruido XPS	0.16	0.90	40
Aislamiento reflectivo compuesto por una lámina de Aluminio puro 100% de 8 $\mu$ + 4mm de burbuja de polietileno FR. Marca: Polynum	0.11	0.05	4

En las siguientes imágenes se observan algunas fotografías reales de las cajas de ensayo, situadas en la terraza de la Escuela de Arquitectura.

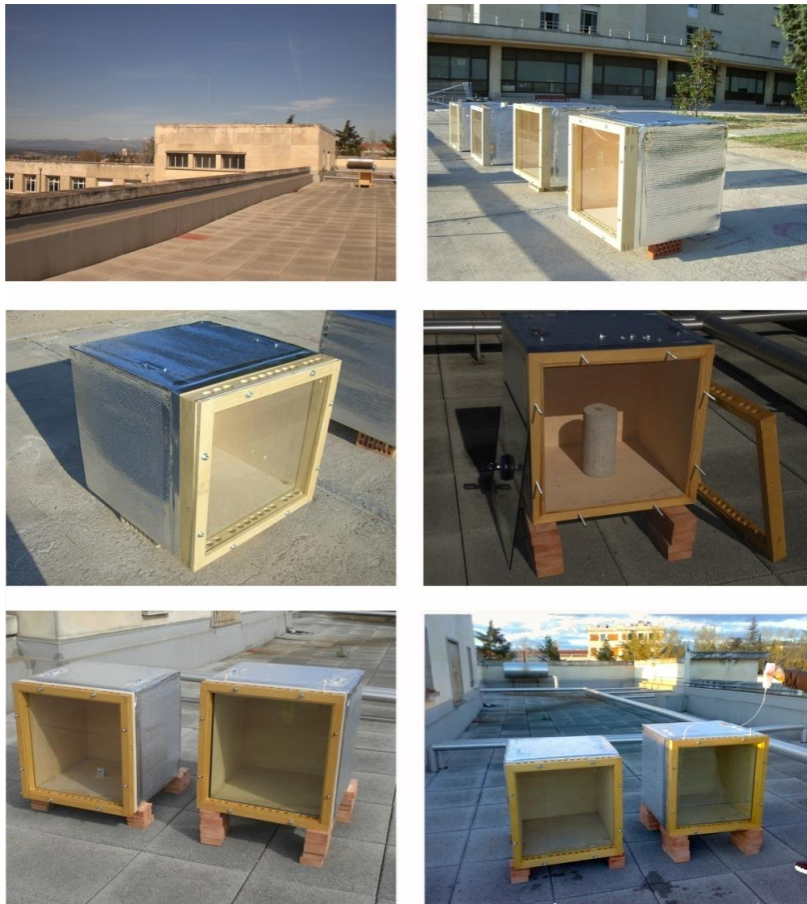


Fig. 7-8. Cajas de ensayo. Fuente: propia

Hasta el momento ya se han realizado diversos ensayos preliminares y sus resultados se han publicado en diversas jornadas. Uno de ellos, ha sido presentado en diversos congresos de investigación en construcción.<sup>153</sup>

Aparte de las ponencias presentadas en el grupo de investigadores dirigido por el profesor Benito Lauret se han realizado trabajos de doctorado, que buscan documentar el estado de la técnica del acristalamiento con cámara de agua, y en el desarrollo de un sistema de gestión domótico, con los componentes necesarios, su instalación y programación, que logre controlar el fluido en la cámara, dentro de un circuito cerrado.<sup>154</sup>

### 7.2.3. INSTRUMENTOS DE MEDIDA.

Los datos se están recogiendo mediante sensores-datalogger<sup>155</sup> de Temperatura y Humedad, Marca Hobo y Modelo Hobo Temperature, RH ©, 1996 ONSET para interior, y HOBO pro series Temp, RH © 1998 ONSET para exterior, tomados en intervalos de cada 15 minutos. A continuación se adjuntan los datos específicos con las fotografías correspondientes de cada sensor.

Los sensores vienen calibrados por un periodo de tiempo determinado de dos años<sup>156</sup>.

#### Sensores dataloggers

1 Registrador de Temp/HR para interior e intemperie. Marca: HOBO Onset Computer Corporation. Modelo: Pro Series RH TEMP.Ref: H08-032-08

- Preparado para condiciones de aire libre en exterior.
- Rango: -30°C a +50°C y 0-100%RH.
- Capacidad de almacenamiento: 65,291 resolución estándar.
- 7 canales.
- Precisión: 0.2-0.4°C y 3% HR.
- Dimensiones: 102 x 81 x 51 mm.
- Batería: 1/2 AA, litio, 3.6V



1 Registrador de Temp/HR para interior. Marca: HOBO Onset Computer Corporation. Modelo: HOBO RH Temp. Marca:



<sup>153</sup> (Giménez Molina, 2008)

<sup>154</sup> (Millán, 2008).

<sup>155</sup> "Los data logger están compuestos de un procesador programable, una memoria, puertos y de uno o varios canales de entrada para la conexión de diferentes sensores. Los data logger suelen tener un abastecimiento propio de energía. A través del sensor se reciben los datos de medición. Un convertidor analógico-digital convierte los datos en datos electrónicos y los graba en la memoria. Los datos registrados son transmitidos a través de los puertos (puerto de serie, USB, LAN, Bluetooth) y analizados por el software. Dependiendo de las mediciones los logger de datos pueden tener uno o más canales para poder conectar diferentes sensores simultáneamente". Fuente: PCE-iberica.

<sup>156</sup> Fuente; HOBO Onset Computer. <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/temperature-data-loggers>.



HOBO Onset Computer Corporation. Modelo: HOBO Temp-RH. ref. H08-0003-02

1 Registrador de Temperatura (tipo termistor) y 1 canal para sondas externas (entradas de 0 – 2,5Vdc y/o 4-20mA). Marca: HOBO Onset Computer Corporation. Modelo: HOBO Temp ref. H08-002-02



1 Registrador de Temperatura. Marca: HOBO Onset Computer Corporation. Modelo: HOBO Temp. ref. H08-001-02

- Rango de temperatura: 20°C to +70°C
- Operating range (logger): - (-4°F to +158°F),
- 0 - 95% RH
- Capacidad: 7944 medidas.
- Tamaño: 2.4" x 1.9" x 0.8"
- Batería: CR-2032 (litio)



Se adjunta hoja de características en anexo 4: metodología experimental: ensayos físicos. HOBO.

#### 7.2.4. PROCEDIMIENTO OPERATIVO DEL ENSAYO

Los ensayos se han realizado en la Terraza Norte de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid a 40°25´N, 3°41´W, porque permite orientar las cajas a Sur, con el 100% de la bóveda celeste sin obstáculos y puede hacerse cualquier día del año. En la figura adjunta 7-9, se observa el emplazamiento exacto de las cámaras de ensayo con un punto rojo.

Las muestras de ensayo tienen finalmente unas medidas de 61,5x61,5 cm, para conformar una cámara interior de 60x60x60cm exactos.

Se han realizado dos grandes grupos de ensayos: captación y pérdidas. En los ensayos de captación es fundamental la orientación elegida: solsticio de invierno (en orientación Sur) y solsticio de verano (orientación Este y Oeste), todo ello según criterios arquitectónicos, mientras que en los de pérdidas es indiferente puesto que se realizan en periodo nocturno.

De modo general las etapas fundamentales del ensayo son las siguientes:

- Preparación del material experimental adecuado a la época del año en curso y espera hasta tener un día con condiciones óptimas (cielo despejado) típicas de la estación, según el pronóstico meteorológico, para la realización del ensayo.
- Programación y colocación de un datalogger en cada una de las dos cámaras de ensayo, (siempre a la sombra, en la pared vertical del fondo a suficiente altura como para que no sean alcanzados nunca por el sol), otro exterior y

eventualmente otro adicional provisto de sonda térmica para medir la temperatura del agua en algún punto seleccionado.

- En el caso de ensayos con apoyo de aparatos de climatización, como se verá más adelante en los puntos 7.5.1 y 7.5.6: funcionamiento del ensayo a ganancias y a pérdidas respectivamente, dentro del grupo de los vidrios con cámara de agua, se deberá tener en cuenta y precisar una correcta preparación y conexión de dichos aparatos y de los instrumentos de control correspondientes, tales como programadores y termostatos.
- Colocación del vidrio patrón en una de las cámaras y del vidrio en estudio en la otra.
- Verificación de todos los instrumentos y aparatos del ensayo, puesta en marcha y comprobación de su correcto funcionamiento.
- Comprobación de que las condiciones meteorológicas son aceptables. En caso de lluvia se aborta el ensayo. En caso de condiciones cambiantes se prolonga el ensayo varios días hasta obtener uno válido (los dataloggers pueden almacenar datos durante casi un mes).
- Transcurrido el periodo establecido para el ensayo y habiendo resultado satisfactorias todas las verificaciones se procede a la recuperación y lectura de los dataloggers.
- Se consideran periodos válidos para el ensayo aquellos que abarcan por completo el fenómeno a estudiar. Por ejemplo para un ensayo de captación a Este basta el periodo que va desde el amanecer hasta el medio día (aproximadamente hasta las 14:00h), y para la realización de un ensayo a captación a Oeste es suficiente con un periodo entre el medio día y la noche. Se ha intentado no obstante, siempre que el tiempo meteorológico lo ha permitido, realizar ciclos completos de veinticuatro horas.
- Se han realizado frecuentes inspecciones visuales durante los ensayos diurnos para hacer diversas comprobaciones sobre el buen desarrollo de los mismos.

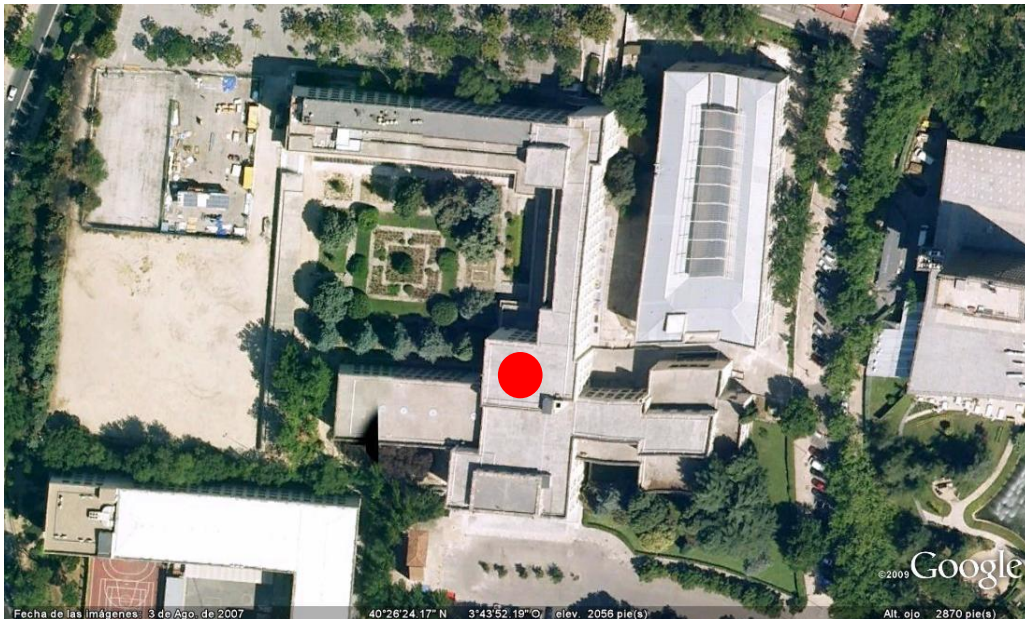
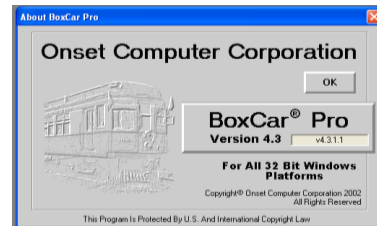


Fig. 7-9. Vista aérea ETSAM. El punto rojo muestra la situación del ensayo.  
Fuente: Google Maps.

#### 7.2.5. LECTURA DE RESULTADOS.

Los datos de los sensores se analizan a partir del programa BOXCAR PRO 4.3. de Onset Computer Corporation. Se trata de un programa de ordenador de la marca HOBO, utilizado para el registro, descarga, lectura y manipulación de los datos de los sensores y registradores de datos de la Marca HOBO utilizados para la realización de los ensayos.



Una vez finalizado el ensayo, el sensor se conecta al ordenador, y obtenemos los datos a partir del programa BOXCAR PRO 4.3. Los datos descargados del programa en bruto, aparecen en forma de gráfica, como se muestra en la siguiente imagen.

Las distintas curvas obtenidas nos muestran la temperatura (en °C) y la humedad en % de todos los días en los que el sensor ha ido almacenando datos.

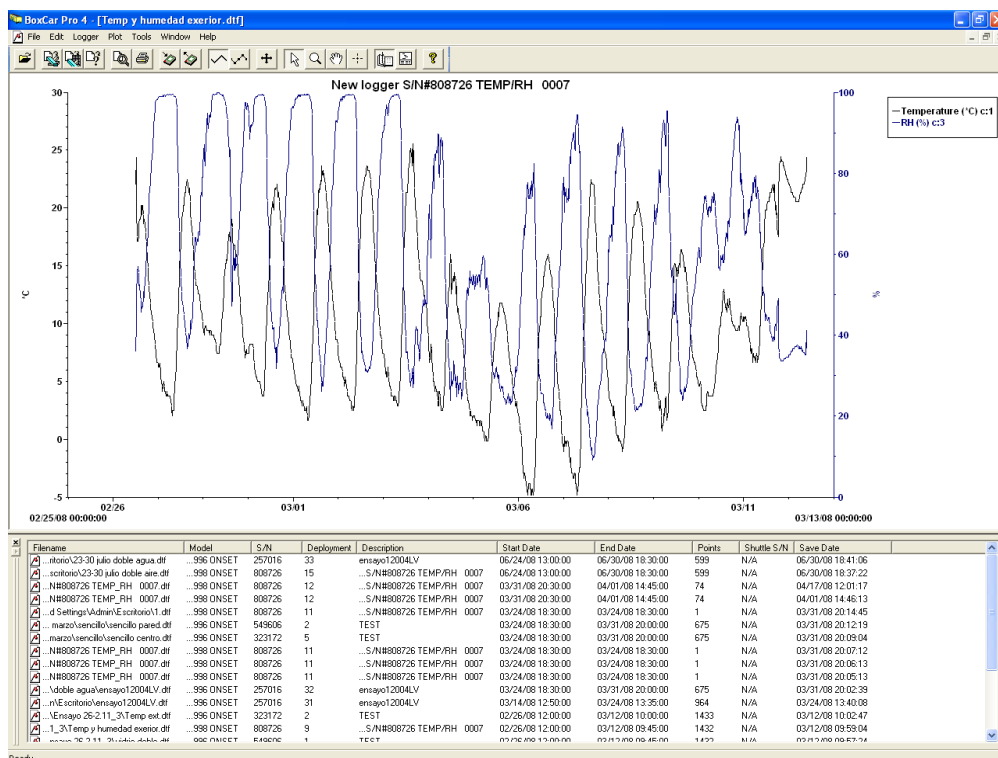


Fig. 7-10. Datos en bruto del sensor HOBO en el programa Box Car Pro. Fuente: Realización propia

Estos datos pueden ser exportados a una hoja de cálculo Excel para su posterior tratamiento. Igualmente se toman los datos meteorológicos de AEMET y por la estación meteorológica de la UCM para su contraste con los tomados por los dataloggers.

### 7.3. CONDICIONANTES DEL ENSAYO.

#### 7.3.1. CONDICIONANTES ATMOSFÉRICAS REALES

Como se ha comentado en el capítulo 1 los valores de los parámetros ópticos varían sensiblemente en función del ángulo de incidencia. De hecho la transmitancia adopta valores constantes hasta ángulos en torno a 30° y disminuye hasta anularse a 90°. La reflectancia tiene un comportamiento complementario, con un mínimo de incidencia normal a 30° aumentando progresivamente hasta llegar a un valor 1 a los 90°. La absorptancia varía con el recorrido óptico de la radiación del entorno al interior del material.

De ahí resulta fundamental un ensayo con condiciones exteriores reales, y no intentar simular las condiciones exteriores y principalmente la radiación solar, en laboratorio, pues se obtendrían medidas fijas según el ángulo de incidencia de la fuente y la intensidad de la misma.

Como se ha observado con los ensayos, un día soleado despejado, puede hacer subir la temperatura del interior hasta los 80°C<sup>157</sup>, sin embargo en un día nublado,

<sup>157</sup> Según datos de los ensayos realizados.

sigue habiendo radiación difusa, y la temperatura se mantiene aproximadamente constante.

La limpieza del cielo también influye en el valor final de la radiación incidente.

### **7.3.2. FECHAS DE ENSAYO Y ORIENTACIONES**

Se han realizado ensayos durante los días más cercanos a los solsticios de invierno y de verano, en función de los vidrios a ensayar en cada momento.

Durante los solsticios de invierno se han ensayado vidrios bajos emisivos, vidrios mixtos y vidrios con agua caliente circulante en su cámara, siempre con orientación Sur, por ser aquella más favorable para este periodo. Durante el invierno, se han realizado ensayos de pérdidas, como a continuación explicaremos.

Durante el solsticio de verano se han ensayado vidrios de control solar y vidrios con agua refrigerada. Para este periodo se eligió orientación Este y Oeste, por ser aquella más desfavorable por tener radiación directa, durante la mañana y la tarde respectivamente. Durante el verano se han realizado ensayos de captación, con la metodología que a continuación explicaremos.

### **7.3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE CAPTACIÓN**

Los ensayos de captación se realizan durante el solsticio de verano e invierno durante el día, que es el periodo más desfavorable y en el cual se produce la mayor falta de confort térmico: excesiva radiación solar durante el día.

Las orientaciones más desfavorables son la Este y la Oeste durante los días del solsticio de verano, y sur durante el de invierno, en la que el sol incide directamente sobre las fachadas.

Para ello, colocamos ambas cajas en la orientación deseada, programando previamente los sensores.

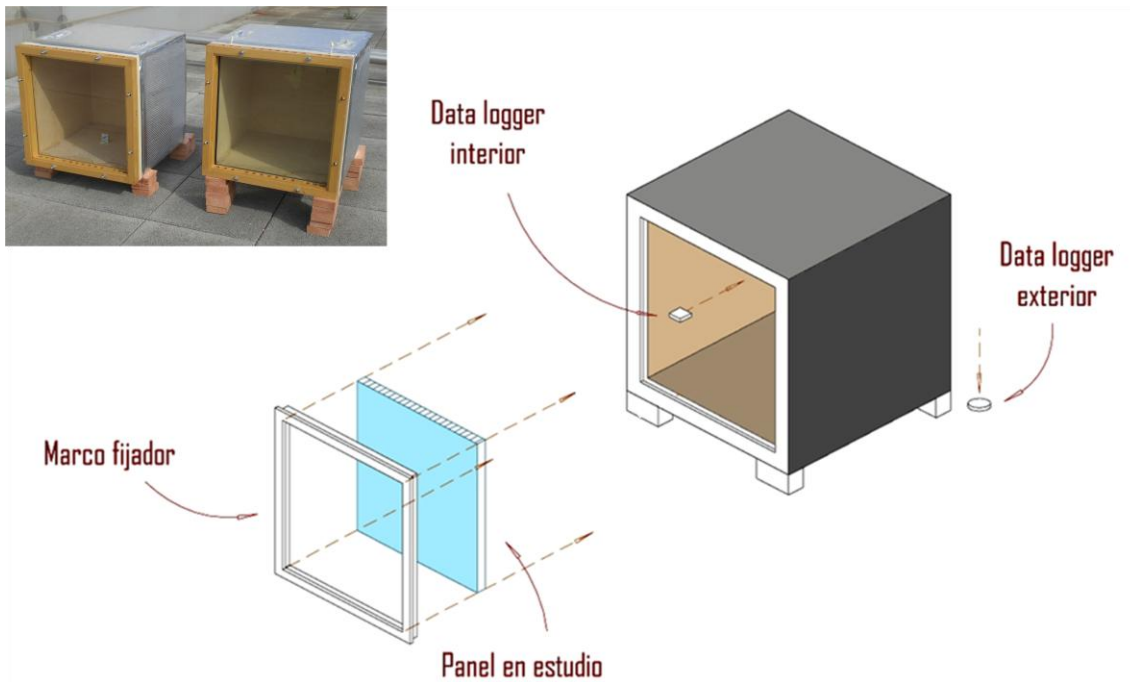


Fig. 7-11. Esquema del funcionamiento del ensayo a ganancias.

El ensayo en su configuración inicial, es decir con las cajas realizadas con los materiales descritos inicialmente, a saber, con 4 cm. de aislamiento térmico, ha resultado idóneo para captación.

A pesar de que las pérdidas por la envolvente no son despreciables, el fenómeno de la captación es tan intenso que la influencia de las pérdidas queda en un segundo término y la lectura de las gráficas permite hacer comparaciones muy claras con el patrón.

#### 7.3.4. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS A PÉRDIDAS.

Los ensayos de pérdidas se han realizado durante la noche, principalmente durante el solsticio de invierno, si las condiciones climáticas son favorables para el ensayo.

Para ello se colocan ambas cajas, en orientación Sur, intentando que estén a la misma temperatura. Para simular la calefacción se introduce una probeta cilíndrica estándar de hormigón caliente en cada caja, de dimensiones 16x30cm. Las cajas se dejan toda la noche a la intemperie. Al día siguiente se recogen los datos y se analizan las curvas, tal y como se expondrá más adelante.

En el caso de las pérdidas el fenómeno es mucho más tenue que en el caso de las ganancias. Las pérdidas por la envolvente aislada se vuelven importantes y enmascararon los resultados experimentales, como se ha podido comprobar con los primeros ensayos realizados.

Este inconveniente ha obligado a reforzar el aislamiento dramáticamente hasta alcanzar los 16 cm. de espesor. De este modo se ha logrado controlar mejor la influencia de las pérdidas por la envolvente aislada, permitiendo obtener datos

experimentales más claros que revelan el comportamiento de la cara acristalada. Este proceso se explica más adelante en detalle.

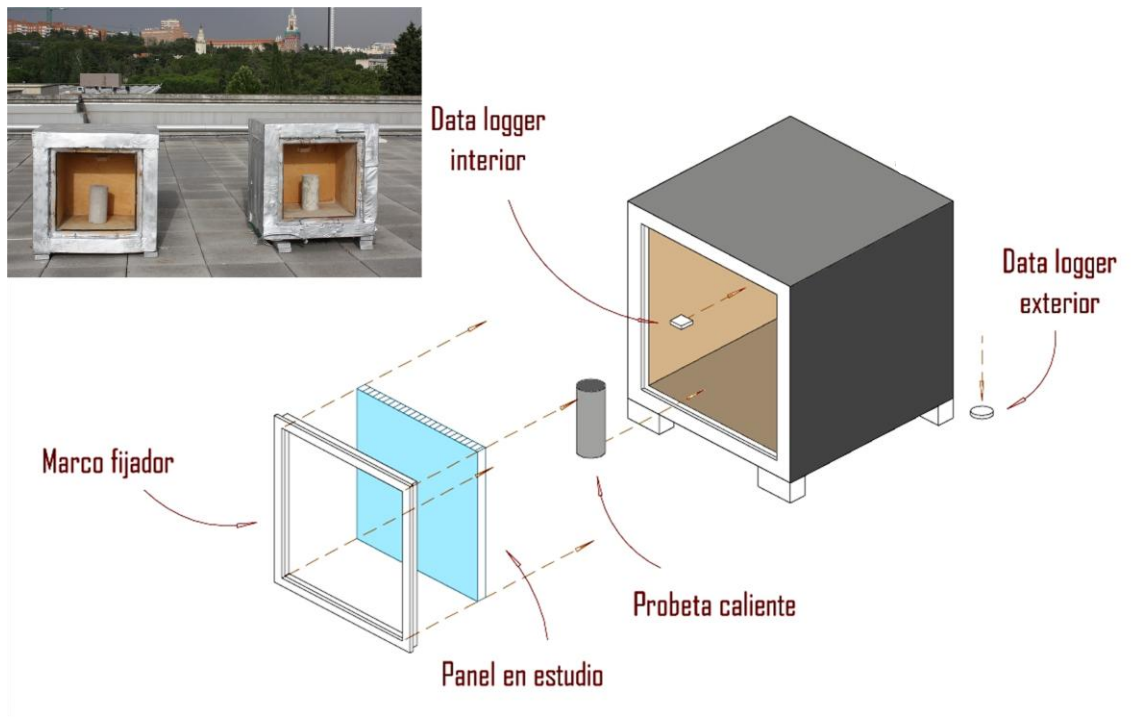


Fig. 7-12. Esquema del funcionamiento a pérdidas.

### 7.3.5. INFLUENCIA DE LAS INCIEMENCIAS METEOROLÓGICAS

Como se ha dicho en la ejecución de los ensayos es absolutamente dependiente del tiempo meteorológico. Numerosos ensayos han debido posponerse o abortarse debido a condiciones meteorológicas adversas.

En primer lugar se han descartado radicalmente los días de lluvia, nieve o granizo, lo que ha producido retrasos importantes en más de una ocasión. En segundo lugar se ha comprobado que los días completamente nublados tampoco son válidos para los ensayos a captación, ya que los valores leídos son muy tenues.

En algunos casos el cambio de estación ha obligado a repetir ensayos al año siguiente, es decir, hasta tener unas condiciones de soleamiento adecuadas, cercanas al solsticio previsto. La temperatura, la radiación, la humedad, el viento, son parámetros variables día a día lo que complica aún más la toma de resultados y su comparación.



Fig. 7-13. Imagen de las cajas de ensayo bajo condiciones climáticas extremas

#### 7.4. MODIFICACIONES DEL ENSAYO.

##### 7.4.1. MODIFICACIONES REALES DEL ENSAYO PARA MEJORAR SUS PRESTACIONES

Tras la realización de diversos ensayos con dichas cajas, se empezó a ver que su comportamiento no era el esperado, especialmente en el ensayo de pérdidas.

Previamente se realizaron unos cálculos con el fin de comparar la cantidad de energía perdida por la parte opaca y compararla con la del vidrio a partir de la siguiente fórmula:

$$Q_n: S \times U \times \Delta T$$

De donde:

S=superficie en m<sup>2</sup>

$\Delta T$ =Diferencia de Temperatura en °C

U=factor U (W/m<sup>2</sup>°C)

Sabiendo que la superficie de las cajas es: 0.6x0.6x5=1.8m<sup>2</sup> por donde hay pérdidas y 0.36m<sup>2</sup> de superficie acristalada.

Energía transmitida o perdida por la caja<sup>158</sup>:

$$Q_{\text{cerramiento opaco}} = 1.8\text{m}^2 \times 0.42\text{W/m}^2\text{°C} \times \Delta T\text{°C} = 0.756\Delta T \text{ W.}$$

$$Q_{\text{vidrio doble 6/8/6}} = 0.36\text{m}^2 \times 3.031\text{W/m}^2\text{°C} \times \Delta T\text{°C} = 1.09\Delta T \text{ W}$$

$$Q_{\text{vidrio sencillo 6}} = 0.36\text{m}^2 \times 5.733 \text{ W/m}^2\text{°C} \times \Delta T\text{°C} = 2.06\Delta T \text{ W}$$

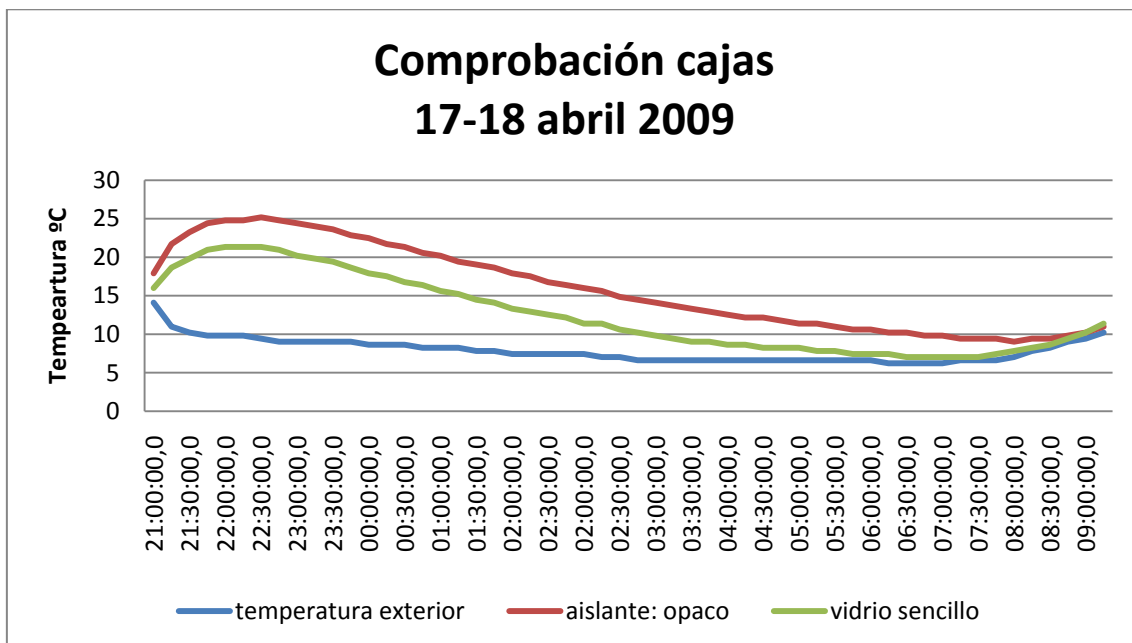
Como se observa, se pierde más energía por el vidrio que por la superficie opaca.

<sup>158</sup> Los cálculos se hacen en función de la  $\Delta T$ . El valor de U es el obtenido mediante el programa Therm. Capítulo 6: Metodología de la simulación. Punto. 6.6.3.1: Caracterización térmica con Therm.



La sumatoria de la energía que perdida por el cerramiento opaco y por el vidrio doble es de 1.846 en función de  $\Delta T$ , siendo un 40.9% la energía perdida por el cerramiento opaco y un 59% la energía perdida por el vidrio doble 6/8/6. Como se observa solo hay un 10% de diferencia de pérdida de energía entre la superficie opaca y acristalada.

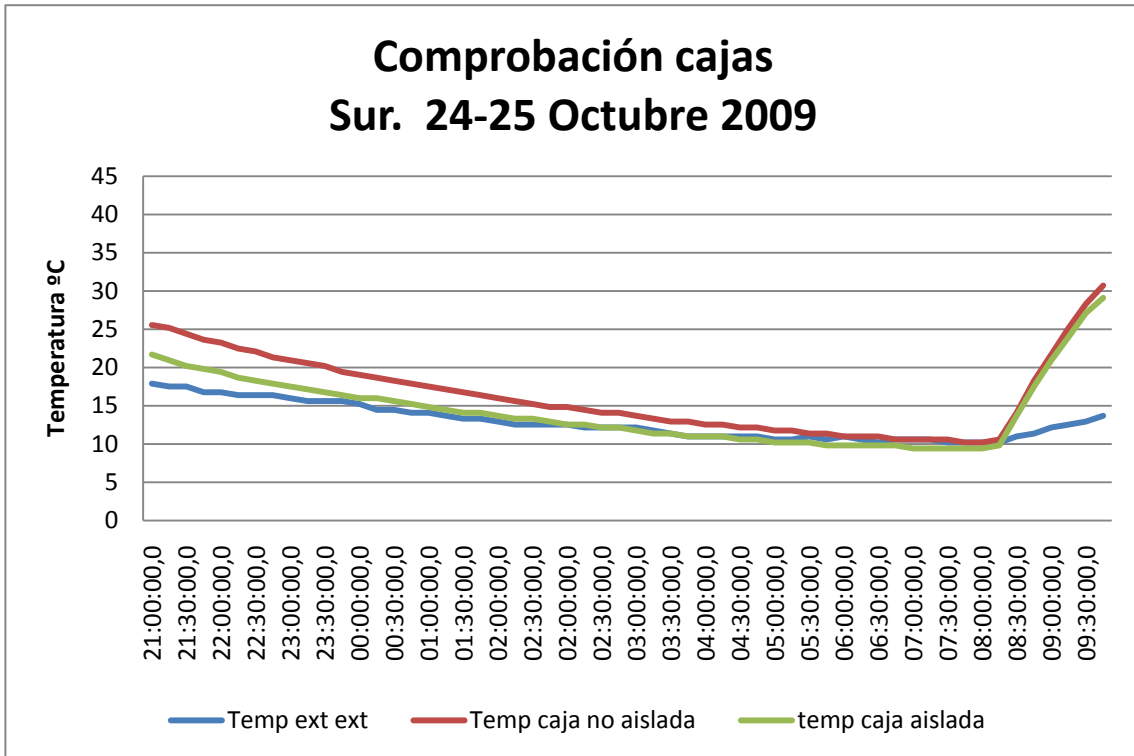
Para ello se hicieron varias comprobaciones, con el fin de averiguar si los problemas venían del marco (puente térmico entre el marco y la caja), al que se le incorporaron unos burletes a la caja de tal modo que hiciera presión entre el vidrio y la caja no tuviera pérdidas, o si era insuficiente el aislamiento de la caja. Tras la realización de diversos ensayos<sup>159</sup>, fue decisivo el que se expone a continuación: se realizó durante la noche del equinoccio de primavera (17-18 de abril de 2009) un ensayo (ensayo nº 34. de pérdidas nocturnas y con probeta de hormigón caliente, aislando con poliestireno de 4cm la cara libre de una de las cajas y la otra con un vidrio sencillo. El resultado es la gráfica adjunta:



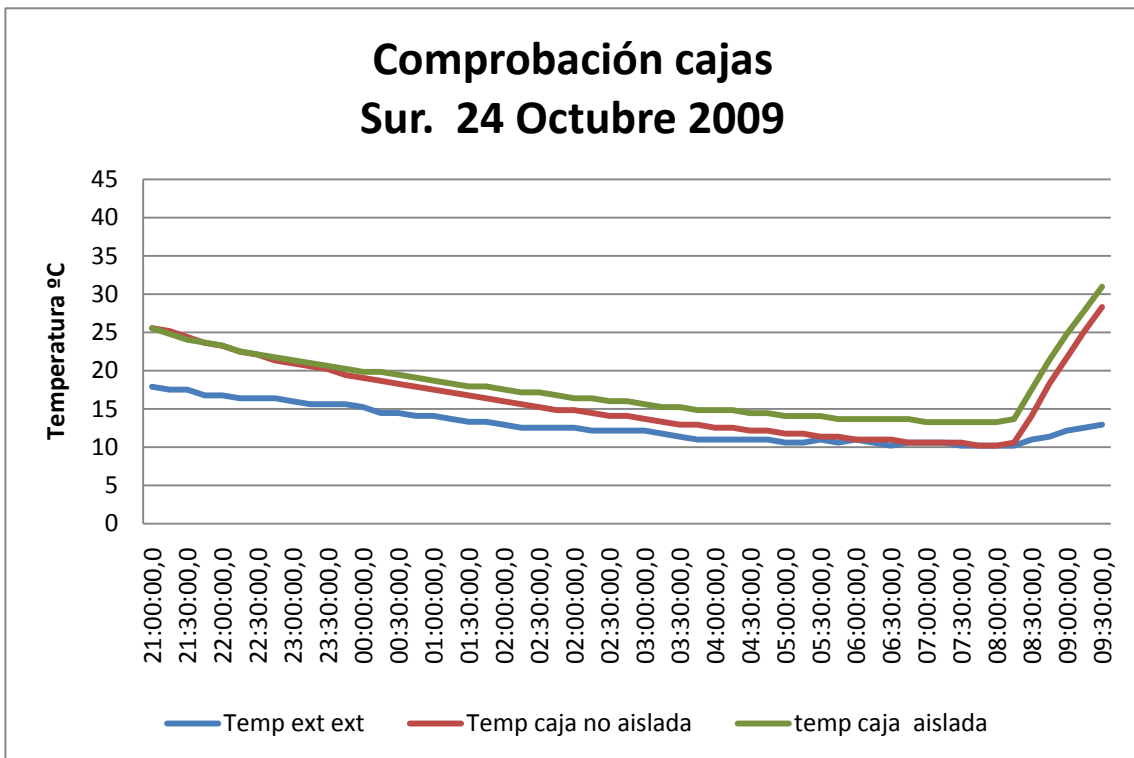
Como se observa la caja totalmente aislada (roja) mantiene unos 5°C más que la caja con vidrio sencillo, aunque las dos líneas (roja y verde) resultan paralelas a lo largo de la noche, lo que equivale a las mismas pérdidas.

Al realizar otro ensayo, esta vez aislando una de las cajas con 16 cm más de poliestireno extruido, y la otra caja, se deja la primitiva, se observa, en un ensayo realizado durante la noche del equinoccio de otoño (24-25 Octubre de 2009), como la caja aislada (roja) mantiene la temperatura un poco mejor que la primitiva caja.

<sup>159</sup> Ver ensayos 31-38. Ver estadillos de ensayos en Anexo 4: metodología experimental: ensayos físicos. Estadillo cajas antiguas y todos los valores numéricos de dicho ensayos en ciclo de ensayos, del Anexo 4.



Si en la misma gráfica, hiciéramos el ejercicio de superponer ambas líneas a la misma temperatura de partida, se observaría como la caja aislada mantiene la temperatura en unos 5°C por encima que la no aislada.



Tras dicha comprobación se opta por tanto por reforzar el asilamiento de ambas cajas mediante placas de poliestireno extruido (XPS) de gran formato de 120 mm de espesor, de forma que finalmente las cajas disponen de un aislamiento exterior total de 200 mm de poliestireno expandido<sup>160</sup>.

Tabla 7-II. Tabla características materiales introducidos en el programa Therm. Fuente: realización propia.

NOMBRE	CONDUCTIVIDAD W/m-K	EMISIVIDAD	ESPESOR mm
Contrachapado de madera	0.09	0.90	12
Aislamiento térmico de Poliestireno extruido	0.033	0.90	40+120

Obteniendo un cerramiento de:

$$\text{VALOR U CERRAMIENTO} = 0,178 \text{ W/m}^2 \text{ K}^{161}$$

En la siguiente imagen se observan las isothermas en la sección según el eje Y. Estas isothermas, son útiles para ver el gradiente de temperatura elevado (isothermas muy juntas), que pueden conllevar el análisis de puentes térmicos, o identificar zonas frías, con el fin de predecir degradaciones térmicas o condensaciones.

En la imagen se observan isothermas paralelas, lo que indica un comportamiento homogéneo del cerramiento.

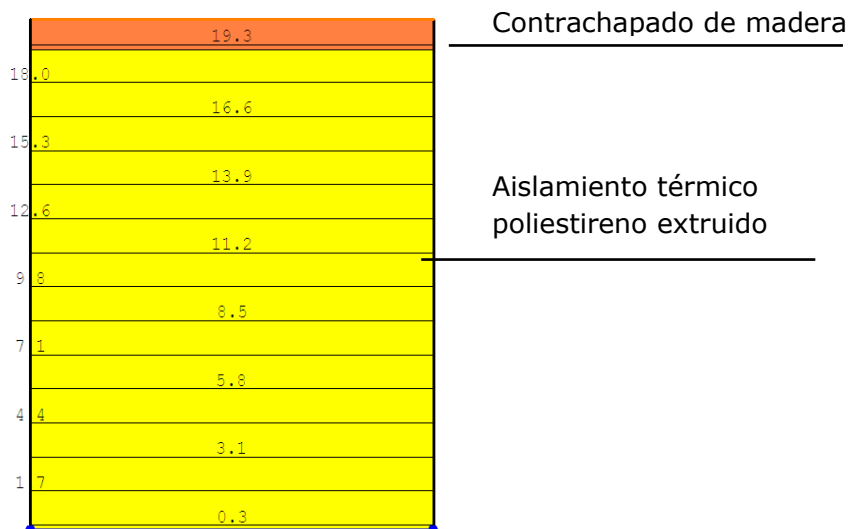


Fig. 7-14. Estudio del flujo de isothermas con el programa Therm 5.2 (LBNL)

<sup>160</sup> Poliestireno extruido marca URSA INDUSTRY. Modelo: BLOCK. Producto XPS sin piel, de superficie lisa con conductividad térmica de 0,033 W·m/K.

<sup>161</sup> Resultado obtenida tras la simulación con el programa Therm 5.2.

Temperatura máxima: 19.3 °C

Temperatura mínima: 0.3 °C

Temperatura exterior: 0°C

Temperatura interior: 20°C

La siguiente imagen, muestra las isotermas, en colores. Cada temperatura representa mediante un color diferente, desde los colores fríos (azules y violetas) como temperaturas bajas, y colores cálidos (rojos y amarillos) como temperaturas altas.

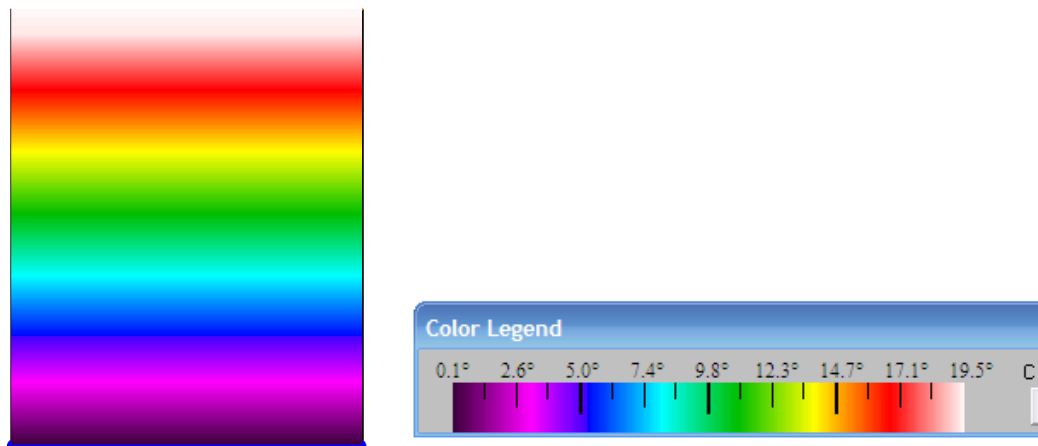


Fig. 7-15. Estudio del flujo de isotermas en bandas de color con el programa Therm 5.2 (LBNL)

Para calcular la energía perdida o transmitida por cada una de las distintas superficies de la caja, realizamos el procedimiento descrito anteriormente en punto 7.4.1.

Se debe comparar la cantidad de energía perdida por la parte opaca y compararla con la del vidrio a partir de la siguiente fórmula:

$$Q_n: S \times U \times \Delta T$$

Donde:

S=superficie en m<sup>2</sup>

$\Delta T$ =Diferencia de Temperatura en °C

U=factor U. W/m<sup>2</sup>°C

Sabiendo que la superficie de las cajas es: 0.6x0.6x5=1.8m<sup>2</sup> por donde hay pérdidas y 0.36m<sup>2</sup> de superficie acristalada.

Energía perdida por la caja<sup>162</sup>:

$$Q_{\text{caja}} = 1.8\text{m}^2 \times 0.178\text{W/m}^2 \times \Delta T = 0.32\Delta T \text{ W.}$$

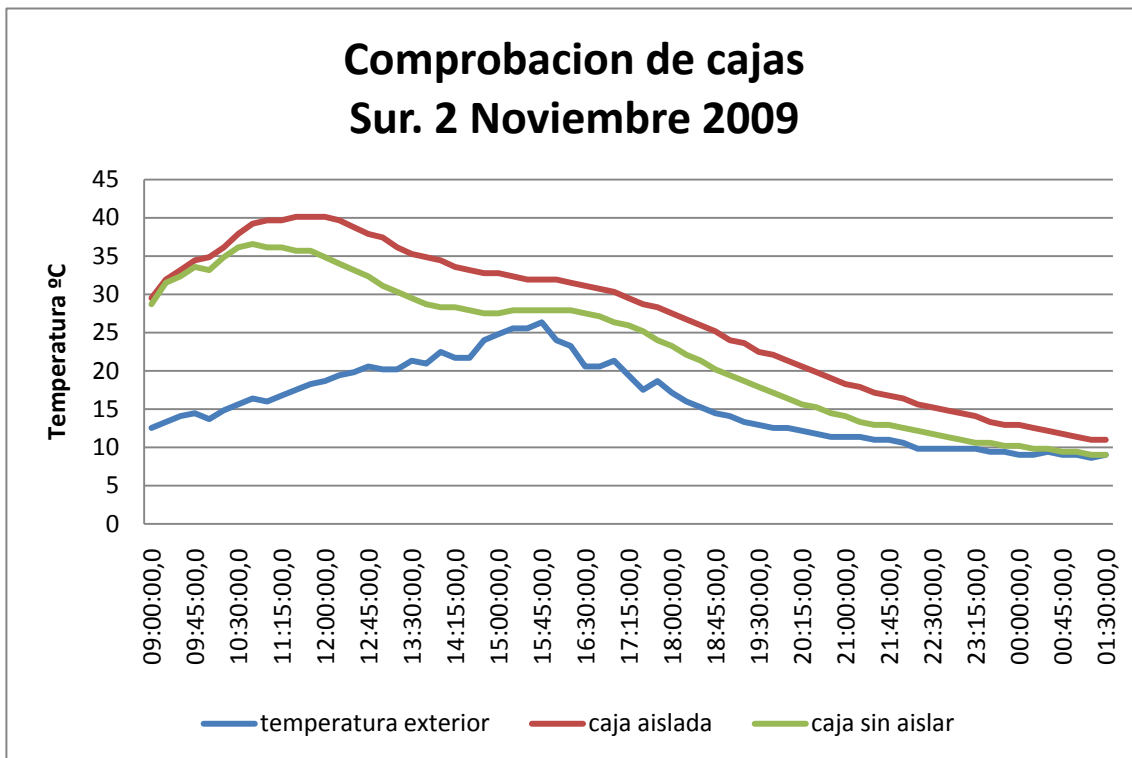
$$Q_{\text{vidrio doble } 6/8/6} = 0.36\text{m}^2 \times 3.031\text{W/m}^2 \times \Delta T = 1.09\Delta T \text{ W}$$

$$Q_{\text{vidrio sencillo } 6} = 0.36\text{m}^2 \times 5.733 \text{ W/m}^2 \times \Delta T = 2.06\Delta T \text{ W}$$

Como se observa, se pierde más energía por el vidrio que por la superficie opaca.

La sumatoria de la energía que perdida por el cerramiento opaco y por el vidrio doble es de 1.41 en función de  $\Delta T$ , siendo un 22.6% la energía perdida por el cerramiento opaco y un 77.3% la energía perdida por el vidrio doble 6/8/6. Ahora las pérdidas por la envolvente aislada son más aceptables.

Para observar las diferencias se aísla una sola caja volvemos a repetir el ensayo 37, con el fin de observar las posibles discrepancias entre las primitivas cajas y las nuevas, ensayando en ambas cajas un vidrio sencillo de 6 mm en un ensayo de captación (ensayo 38), confirmando nuestra hipótesis: las cajas estaban mal aisladas. No tienen significancia alguna en los ensayos de captación como se observa, pero en los de pérdidas llega a haber una diferencia de hasta más de 5°C de temperatura.



Gráfica 7-1. Ensayo 38. Fuente: realización propia

<sup>162</sup> Los cálculos se hacen en función de la  $\Delta T$ . El valor de U es el obtenido mediante el programa Therm. Capítulo 6: Metodología de la simulación. Punto. 6.6.3.1: Caracterización térmica con Therm.

En las siguientes imágenes se muestran dos fotografías, antes y después de la modificación.



Fig. 7-16. Modificación del ensayo. Antes (izquierda) y después (derecha). Fuente: realización propia.

#### 7.5. ENSAYOS ESPECIALES PARA VIDRIOS CON AGUA

Dadas las posibilidades de control del vidrio con agua circulante, tal y como ha quedado expuesto anteriormente, y habida cuenta de que puede estar conectado a una instalación cuya complejidad no está limitada a priori, se han incorporado algunos aparatos adicionales al ensayo que componen una instalación con objeto de observar las posibilidades de control del mismo.

A lo largo del ciclo de ensayos se han ido mejorando los aparatos con objeto de perfeccionar el ensayo y poder evaluar la máxima precisión de las aportaciones en materia de eficiencia energética que el vidrio con agua circulante puede proporcionar.

Así en lo relativo a la impulsión del agua se han utilizado diferentes modelos de bombas, desde una pequeña bomba de aeromodelismo a 12V, hasta una bomba de achique naval.

Igualmente para conseguir disipar calor del agua se ha utilizado en primer lugar un pequeño radiador de moto, que eventualmente se ha llegado a usar como intercambiador de calor sumergido en el termo-tanque utilizado. Posteriormente se ha mejorado el dispositivo con la incorporación de un radiador de automóvil con ventilador eléctrico incorporado, obteniendo una mejor eficacia.

La preparación del agua caliente para realizar ensayos nocturnos a pérdidas se realizaba al principio en el laboratorio en un quemador portátil de gas butano. Posteriormente se ha incorporado una pequeña caldera eléctrica con termostato.

Con respecto a los aparatos de control se han utilizado un programador analógico y un termostato digital convencional de calefacción y un calentador digital de consumo.

La incorporación de aparatos<sup>163</sup> al ensayo lo complica considerablemente y da lugar a una innumerable serie de fallos<sup>164</sup> que han obligado frecuentemente a repetir ensayos y que ha resultado muy laborioso controlar.

El motivo y la oportunidad de la incorporación de cada uno de estos aparatos se comprenderá mejor en la exposición del ciclo de ensayos, como un proceso de búsqueda en el que se van dando pasos sucesivos e incorporando mejoras a la vista de los resultados obtenidos.

No debe olvidarse que al tratarse de un ensayo diseñado a propósito para la presente investigación, su correcta ejecución es y ha sido una cuestión delicada, convirtiéndose prácticamente en un nuevo objetivo de la tesis la puesta a punto del ensayo. Por ello se ha considerado de gran interés documentar los fallos ocurridos y las soluciones aplicadas a los mismos, como un proceso de mejora y puesta a punto del método experimental propuesto.

Un aspecto importante aún no reseñado es la consecución de la transparencia del vidrio en todo momento. Como se señaló previamente en los objetivos, se pretendía la consecución de un vidrio dinámico capaz de mejorar las prestaciones energéticas de los vidrios convencionales, tanto en pérdidas como en ganancias, conservando en su totalidad la transparencia en todo momento, tal y como se puede apreciar en la imagen 7-17.



Fig. 7-17. Total transparencia en un vidrio con cámara de agua

<sup>163</sup> Para detalles de todos los aparatos utilizados, ver anexo 4: aparatos y dispositivos para el ensayo modificado donde quedan expuestos todos los aparatos utilizados, y el punto de ciclo de ensayos donde se exponen.

<sup>164</sup> Ver Anexo 4: Metodología experimental: ensayos físicos. Fallos o averías comunes y procedimiento de resolución.

### 7.5.1. FUNCIONAMIENTO DEL ENSAYO A CAPTACIÓN

El funcionamiento definitivo del ensayo a captación se realiza tal y como se expone en la figura adjunta, realizados generalmente durante el solsticio de verano.

A continuación se van a describir los diferentes ensayos llevados a cabo para el presente trabajo, donde se han empleado los siguientes elementos que forman parte del circuito de agua, cuyo diseño se ha ido variando y optimizando durante el desarrollo de los ensayos.

En lo relativo a vidrios con cámara de agua se ensayará en tres situaciones: agua en reposo, agua refrigerada libremente en un radiador externo de pequeño tamaño y agua refrigerada en un radiador mediano con ventilación forzada.

#### Ensayo con agua en reposo

Los primeros ensayos con un acristalamiento con cámara de agua y cuyos resultados fueron presentados en las II Jornadas de Investigación en la Edificación<sup>165</sup> y en las II Jornadas de Investigación en la Construcción<sup>166</sup>. (Ver anexo 1: artículos).

Para los primeros ensayos realizados, se ha rellenado con agua un vidrio doble 6/8/6 al que se le dejó previamente dos tubos de plástico que unían el exterior con la cámara, con el fin de llenar la cámara con agua a temperatura ambiente, a unos 20°C (ver Fig. 7-18).



Fig. 7-18. Procedimiento de llenado del vidrio doble con cámara de agua y detalle del tubo de plástico.

Para los siguientes ensayos se propone poner agua en movimiento, y también debido a roturas acaecidas se utiliza un vidrio 4+4/8/4+4, con objeto de impedir la fuga del agua en caso de rotura.

<sup>165</sup> (Gimenez Molina & Lauret Aguirregabiria, 2008b)

<sup>166</sup> (Gimenez Molina & Lauret Aguirregabiria, 2008a)



### **Ensayo con agua refrigerada libremente en un radiador pequeño (variante a).**

La realización de este ensayo parte de los anteriores realizados con agua en reposo. Puesto que no se conseguían los resultados esperados, se pensó en la posibilidad de la refrigeración del agua haciéndola pasar por un pequeño radiador de moto, (modelo 1, Anexo 4: Aparatos y dispositivos para el ensayo modificado y recirculación de agua con la ayuda de una pequeña bomba eléctrica (modelo 1, Anexo 4), accionada por una batería de coche a 12V, con el fin de refrigerar el agua con la temperatura exterior. Estos ensayos se realizan en ciclo de verano y orientación Este y Oeste. Este radiador se colocó en la parte inferior de la caja de ensayo, para evitar un calentamiento excesivo.

Una pequeña parte de estos ensayos y los anteriores se han publicado en el I International Conference on Construction and Building Research (COINVEDI)<sup>167</sup> que se adjunta en el Anexo 1: artículos.

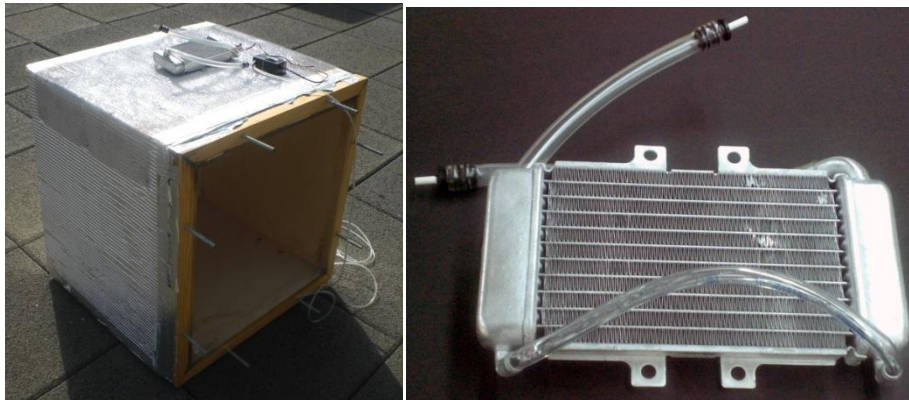


Fig. 7-19. Fotografía de realización del ensayo refrigerado a izquierda, y a derecha, radiador de agua utilizado.

### **Ensayo con agua refrigerada libremente en un radiador pequeño (variante b)**

Una variación del ensayo anterior, consiste en la colocación del radiador en el interior de un termotanque utilizado, tal y como se observa en la siguiente fotografía, con el fin de comprobar las posibilidades de calentar agua para calefacción.

<sup>167</sup> (Giménez Molina & Lauret Aguirregabiria, 2009)

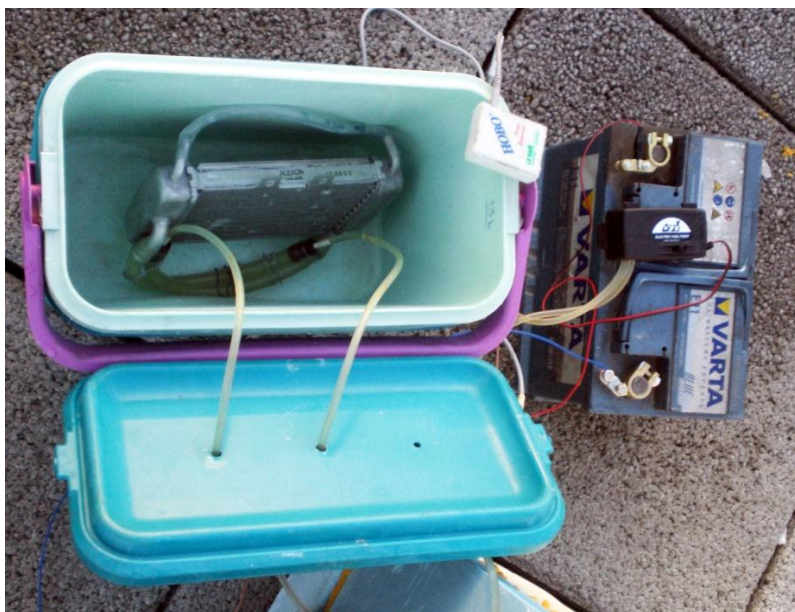


Fig. 7-20. Fotografía donde se observa el radiador pequeño introducido en el depósito de agua. A su lado la bomba de recirculación de agua junto a su fuente de electricidad: batería a 12V.

### **Ensayo con agua refrigerada libremente en un radiador mediano con ventilación forzada.**

Dado que no se obtenían los resultados esperados con el radiador modelo 1 (Ver anexo 4: Aparatos y dispositivos para el ensayo modificado, se pensó en la modificación de diversos aspectos del ensayo, de la que parte de ellos se utilizarán también en los ensayos a pérdidas.

Uno de los problemas que se venían observando tras la realización de ensayos era la entrada de agua al vidrio, situada en un primer momento en los laterales del vidrio, a 10 centímetros de la parte superior y otros diez de la inferior. Se llenaba principalmente por la apertura superior y se vaciaba y se recirculaba por la inferior. A la hora del vaciado era un problema, pues el agua se quedaba siempre estancada en el fondo ensuciando el vidrio. Por otro lado el sistema de conexión y desconexión de los tubos del circuito para el llenado y el vaciado del vidrio no estaba bien resuelto y daban serios problemas.

Posteriormente se decide que el procedimiento y llenado del vidrio se realizaría mejor mediante la apertura de tres aberturas superiores y tres inferiores de 6mm, evitando de este modo las aperturas laterales, realizándose de ese modo un llenado equitativo e igualitario por toda la superficie, estando unidos los tres mediante unos colectores de conexión rápido, tal y como se puede observar en las fotografías adjuntas.

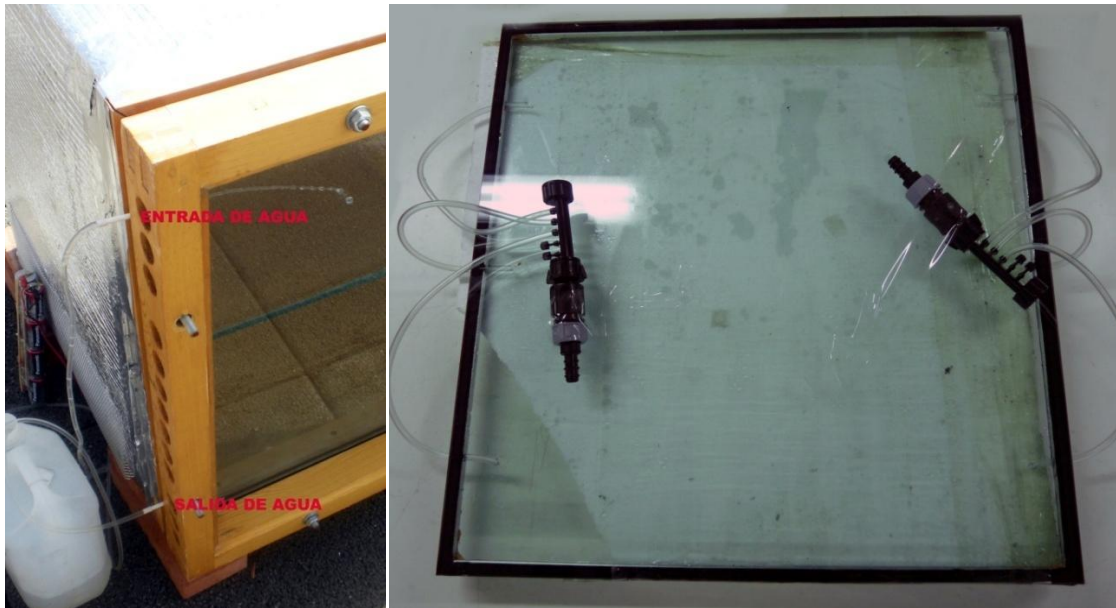


Fig. 7-21. Comparación de la antigua (izquierda) y nueva (derecha) propuesta de llenado y vaciado.



Fig. 7-22. Detalle del colector superior e inferior del vidrio con enganche de fácil apertura y cierre mostrando los tres conductos de 6x4mm.

Los taladros del vidrio se realizaron mediante un taladro y brocas para aluminio de rosca métrica M6, extrayendo posteriormente el material secante que contenía el bastidor de aluminio mediante una máquina de aire comprimido.

Para el llenado del vidrio, es necesario tener en cuenta el dejar uno de los conductos de 6mm libre, para la compensación de las presiones entre el interior y el exterior evitando la rotura del vidrio. Dos puntos a tener en cuenta para un

correcto funcionamiento en todo momento es el cebado de la bomba y eliminación total del aire en el circuito para una perfecta recirculación.

Los conductos transparentes conectados al vidrio son de diámetro  $\Phi 6/4\text{mm.}$ , y estos se conectan a su vez a un colector de conexión rápida, que nos hace pasar todo el sistema a un diámetro  $\Phi 16/14$ , de modo que la pérdida de carga ocasionada por la bomba de salida generalmente  $\Phi 18/6$  no sea excesiva al pasar a  $6 \times 4$ .

En el interior de la caja de ensayo se introduce un termostato, con el fin de fijar la temperatura de accionamiento de la bomba cuando convenga.

El funcionamiento del sistema es muy sencillo. El colector de entrada del vidrio con cámara de agua se conecta a una bomba, y ésta a su vez a un intercambiador de calor que incorpora un ventilador, conectado éste de nuevo al canal de entrada del vidrio. En el interior de la cámara se encuentra el termostato conectado a la bomba, estableciendo la temperatura de consigna en  $25^{\circ}\text{C}$ . Cuando la temperatura del interior de la caja sube por encima de la temperatura de consigna fijada, se pone en marcha la bomba, accionando el ventilador haciendo recircular toda el agua por el radiador.



Fig. 7-23. Fotografía del funcionamiento del ensayo a pérdidas.

La medición de la temperatura del agua en el interior del vidrio resultaba siempre un problema. Para ello se utiliza la sonda térmica de medición del agua junto con el datalogger de temperatura interior especificado en el anexo. Se comenzó midiendo la temperatura del agua en el depósito aislado de agua, no resultando ser eficiente.

Finalmente, y tras varias pruebas erróneas, entre ellas, la de colocar el sensor junto a un racor de cobre que unía dos conductos de 18x14mm, por su alta capacidad conductora, pero no dio resultado.

El último intento y finalmente exitoso, fue el de la sustitución de uno de los tres conductos de 6x4mm para el llenado del vidrio por la sonda, quedando de este modo la sonda totalmente introducida en la cámara de agua mostrándonos finalmente la temperatura exacta. (Ver imagen adjunta).



Fig. 7-24. Detalle de la sonda de temperatura del agua junto al sensor y del colector de entrada. Fuente: fotografía de archivo.

En el esquema adjunto se observa el funcionamiento, donde la T expresa el termostato, y la ST, indica la sonda térmica, en este caso introducida en el vidrio.

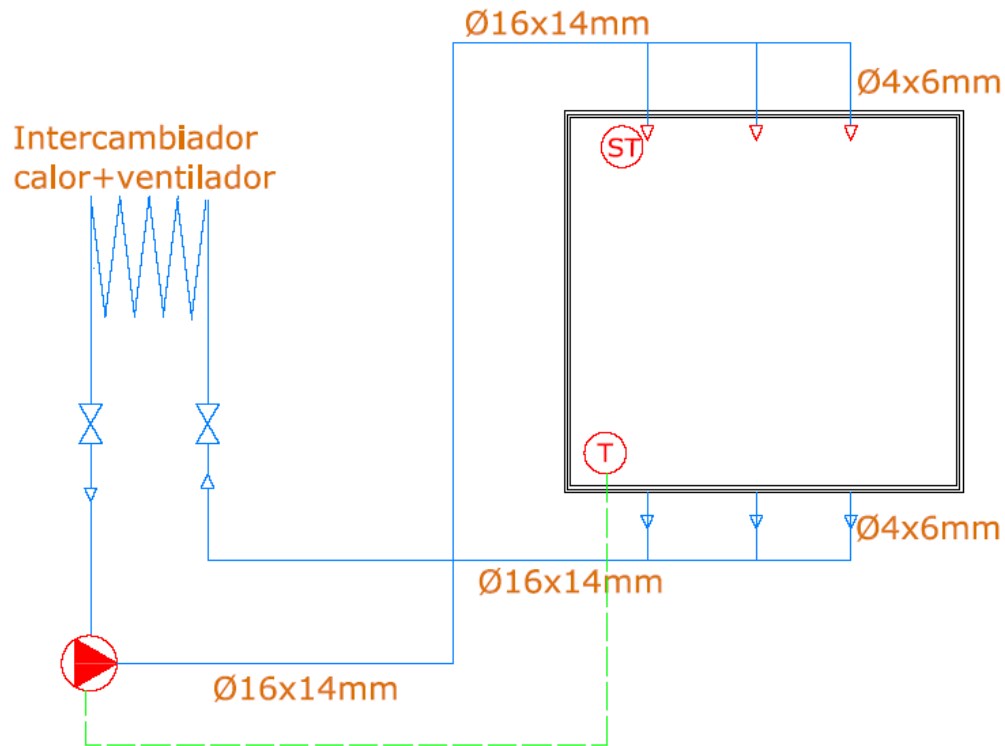


Fig. 7-25. Esquema de funcionamiento del ensayo a pérdidas. Fuente: archivo propio

En los últimos ensayos realizados, para conectar la bomba que funcionaba a 220V con el radiador a 12V, y con el fin de no mezclar dos corrientes en el mismo circuito, se interpuso un rectificador de corriente de alterna a continua, con el fin de pasar la corriente alterna (AC) a continua (DC).

En los distintos ensayos reseñados, se han utilizado diversas bombas, tal y como se explica en el (Anexo 4: Aparatos y dispositivos para el ensayo modificado en orden según su aparición y utilización debido a diversos fallos (Anexo 4, Fallos o averías comunes y procedimiento de resolución, principalmente por fallos del motor y problemas en la potencia puesto que la altura de columna de agua reseñada en las especificaciones, no correspondía con la realidad).

#### 7.5.2. FUNCIONAMIENTO DEL ENSAYO A PÉRDIDAS

En lo relativo al funcionamiento del vidrio con cámara de agua a pérdidas, se analizará en tres situaciones distintas: agua caliente en reposo, generación de agua caliente utilizando dos circuitos y generación de agua caliente utilizando un solo circuito.

##### **Ensayo con vidrio con agua caliente en circulación continua.**

Para la realización de estos ensayos se parte de la misma base que los anteriores: un vidrio de composición 4+4/8/4+4 y un vidrio patrón compuesto por un vidrio doble 6/8/6 con cámara de aire. Se calentó 13 litros de agua en el laboratorio hasta

llegar una temperatura de 70-80°C, y se vertió en el depósito aislado, tal y como muestra la siguiente imagen.



Fig. 7-26. Calentamiento del agua mediante una bombona de camping gas y posterior vertido del agua en el depósito.

Para los próximos ensayos se quiere mejorar con el fin de lograr una caracterización completa del ensayo durante toda una noche y no solo durante unas pocas horas. Entre otras se plantea la mejora de las cajas con nuevo aislamiento a observarse pérdidas.

Los ensayos que se exponen a continuación se han hecho en colaboración con la doctoranda Belén Pérez-Pujazón, en una investigación conjunta con su trabajo tutelado bajo la dirección del profesor Benito Lauret Aguirregabiria.

#### **Ensayo con vidrio con agua caliente en circuito abierto.**

Se calentó 13 litros de agua en el laboratorio, hasta llegar a una temperatura de 70-80°C, y se vertió en el depósito aislado. La bomba se conectó al termostato (T) descrito en el Anexo x, y en los ensayos a captación, y ésta a su vez a la batería de 12V, de modo que cuando la temperatura del interior de la caja bajara por debajo de la temperatura de consigna del termostato, establecida en este caso a 22°C, la bomba comenzara a funcionar y recircule el agua caliente. La temperatura del depósito aislado se midió constantemente mediante una sonda de temperatura (TS) colocada en su interior, tal y como se indicó en los ensayos a captación.

El esquema del ensayo se muestra en la Fig. 7-27 adjunta.

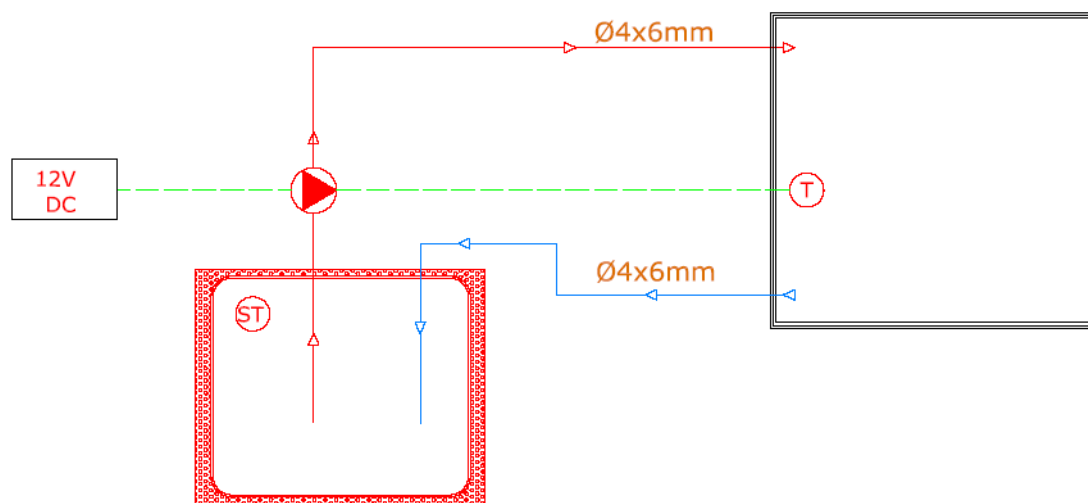


Fig. 7-27. Esquema de ejecución del ensayo. Circuito abierto.

### Ensayo con vidrio con cámara de agua en circuito cerrado.

Posteriormente se realizó un ensayo a partir del mismo esquema que el anterior, pero intentando solucionar las pérdidas del circuito, cerrándolo, mediante un pequeño radiador de moto, sumergido en agua. Aunque la función del radiador de agua es la de intercambiador de calor, aquí se pretendía su uso como modo de cerrar todo el circuito, tal y como muestra el siguiente esquema.

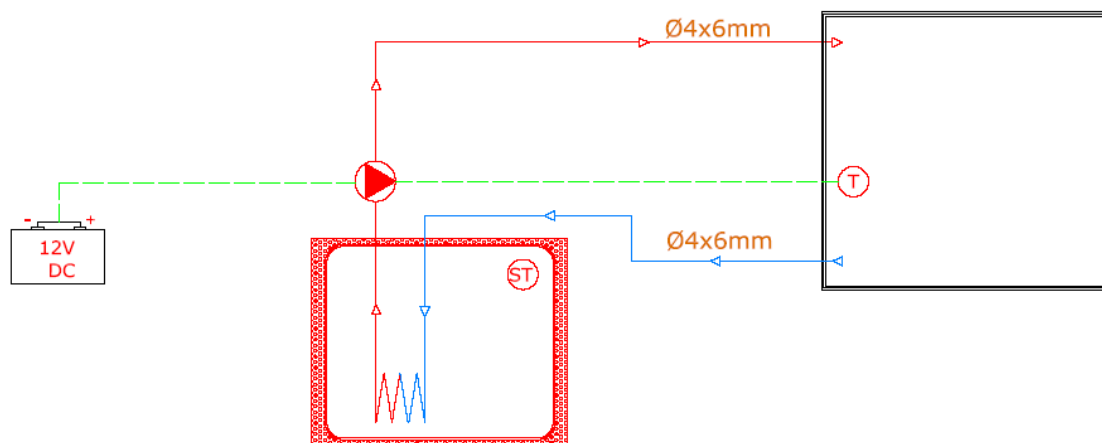


Fig. 7-28. Esquema de ejecución del ensayo. Circuito cerrado.



En la fotografía 7-29 se puede observar el proceso de llenado del depósito con agua caliente donde se observa el circuito cerrado con el radiador en el interior del depósito.



Fig. 7-29. Izquierda: vertido del agua caliente en el interior del depósito. Derecha. Ensayo final.

Se propone el uso de mejoras, entre ellas el uso de un termo capaz de mantener el agua caliente toda la noche.

**Ensayo con vidrio con cámara de agua y generación de agua caliente. Dos circuitos: primario y secundario.**

Para la realización de este ensayo se hicieron algunas mejoras, a partir de los problemas observados en los anteriores. Primero se pretendía el mantenimiento de la caja con vidrio con agua en el rango de confort establecido durante toda la noche, no solo durante unas horas. Para ello, debíamos mantener la temperatura del agua caliente constantemente, y se consiguió mediante un termo de 10 litros de capacidad, tal y como se explica en el anexo 4: Aparatos y dispositivos para el ensayo modificado.

Para el ensayo en cuestión se crearon dos circuitos, por miedo a que los conductos de plástico al pasar el agua caliente, no resistiera y dilataran, produciendo fugas en el circuito. Se bombea agua con una bomba modelo 1 al circuito secundario, constituido por el depósito aislado y el vidrio. En dicho depósito medimos la temperatura del agua mediante una sonda. Mediante una bomba de acuario sumergida modelo 2, se impulsa agua desde el depósito hasta el vidrio. Dicha bomba está conectada a un termostato colocado en el interior de la caja, que activa la bomba cuando la temperatura es inferior a la de consigna, es decir: 20°C.

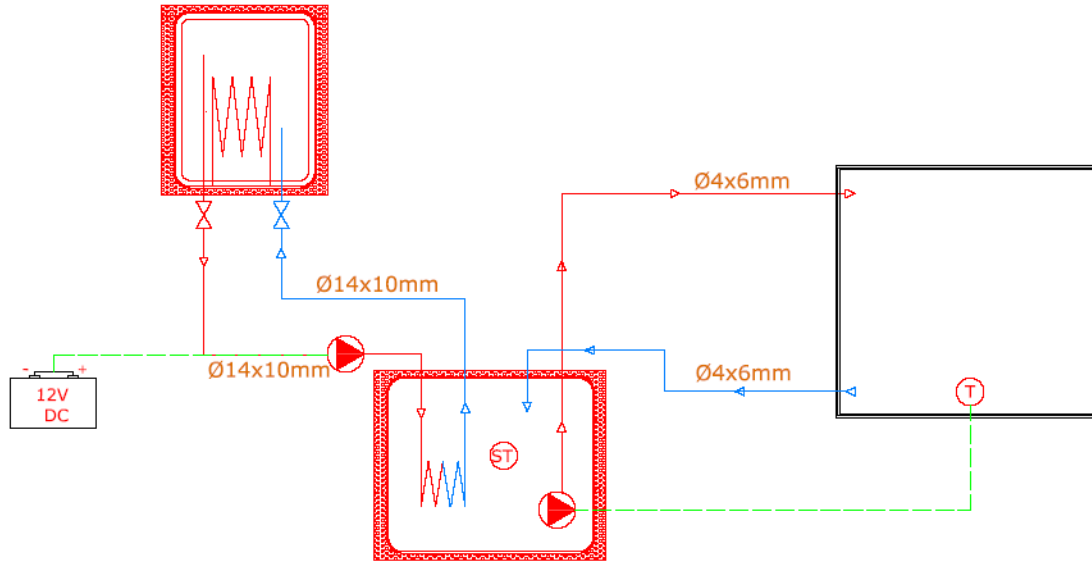


Fig. 7-30. Esquema de ejecución del ensayo. Circuito primario y secundario. Fuente: realización propia.

Las figuras siguientes (figura 7-31) muestran el estado general del ensayo. En la figura de la izquierda se observa el circuito primario (termo eléctrico conectado a conductos de 6x4mm) y la bomba modelo 1 conectada a la batería de coche de 12V. El circuito secundario funciona con la bomba modelo 2 conectada a la red eléctrica.



Fig. 7-31. Izquierda: fotografía general del ensayo. Derecha: detalle de los dos circuitos primario y secundario.

Finalmente, se añadió al ensayo un contador de energía, de modo que se pueda cuantificar la energía consumida durante toda la noche.

Debido a los problemas de llenado y pérdidas, hubo que replantearse un nuevo llenado y vaciado, así como la utilización de nuevas bombas de recirculación.

**Ensayo con vidrio con cámara de agua, generación de agua caliente con un solo circuito (primario) y nuevas mejoras.**

Se proponen nuevas mejoras tanto para el llenado como para el vaciado, tal y como se ha comentado en los ensayos a captación.

La bomba utilizada para tal ensayo ha sido una bomba de acuario capaz de funcionar sin estar sumergida modelo 3, con doble conducto de entrada (aspiración) y salida (impulsión), de  $\Phi 16 \times 14 \text{mm}$ . La bomba, resultó tener pérdidas por lo que tuvimos que colocarla en el depósito, para que funcionara como sumergida. Uno de los motivos de la compra de una bomba de esas características era la eliminación del depósito de agua intermedio o secundario, de modo que se obtuvieran menos pérdidas.

La sonda del agua se coloca en el depósito, por lo que su lectura pierde precisión. La temperatura del termostato del termo se fijó en  $40^\circ\text{C}$ .



Fig. 7-32. Fotografía del ensayo de 31 de Marzo.

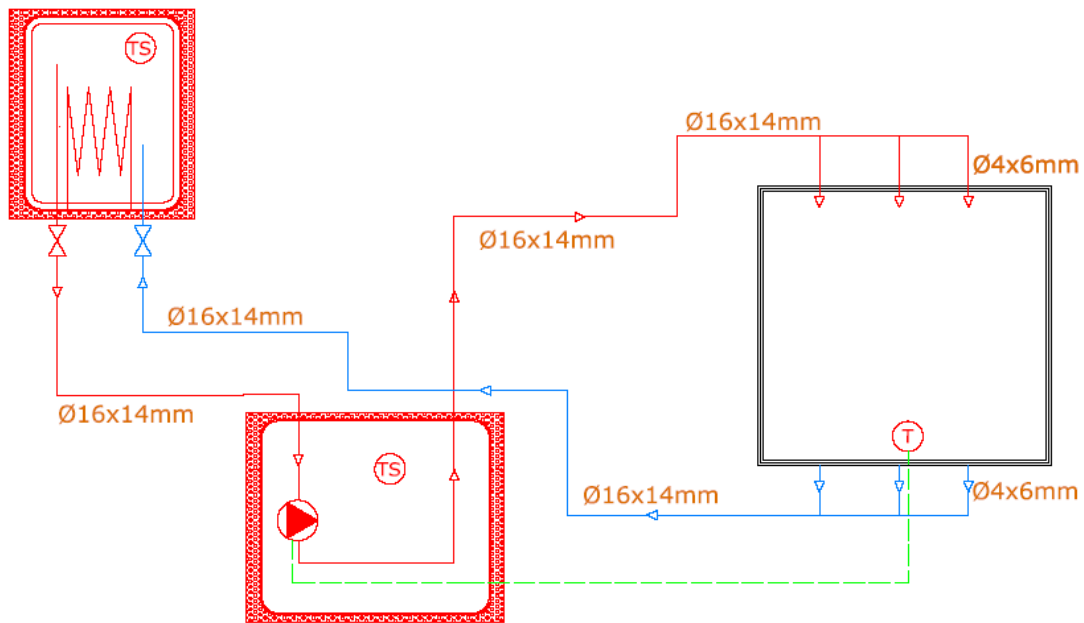


Figura 1. Esquema de ejecución del ensayo. Circuito primario (termo). Fuente: realización propia.

Se plantea la compra de una nueva bomba estanca para no depender del depósito y no sumergible, y la colocación de la sonda de agua en otro sitio, de modo que se pueda medir de un modo más fiable la temperatura del agua.

### **Ensayo de vidrio con cámara de agua. Generación de agua caliente en un solo circuito eliminando el depósito intermedio.**

Para la realización de este ensayo se compró una nueva bomba de acuario modelo 4, estanca, capaz de funcionar fuera y dentro del agua con el fin de eliminar el depósito intermedio.

La bomba, disponía de doble conducto, uno de aspiración, y otro de impulsión, capaz de funcionar a 1000 o 2000 l/min (ver figura adjunta) funcionando para el ensayo a 1000 l/min, conectada a un termostato en el interior de la caja, estableciendo la temperatura de consigna en 20°C. La ejecución fue la misma que la anterior, con la salvedad de la eliminación del depósito intermedio y la sonda de temperatura se colocó pegada a un racor de cobre con el fin de medir la temperatura del agua de un modo más preciso, tal y como se ha comentado anteriormente en los ensayos de captación.



Fig. 7-33. Detalle de la bomba de circulación.

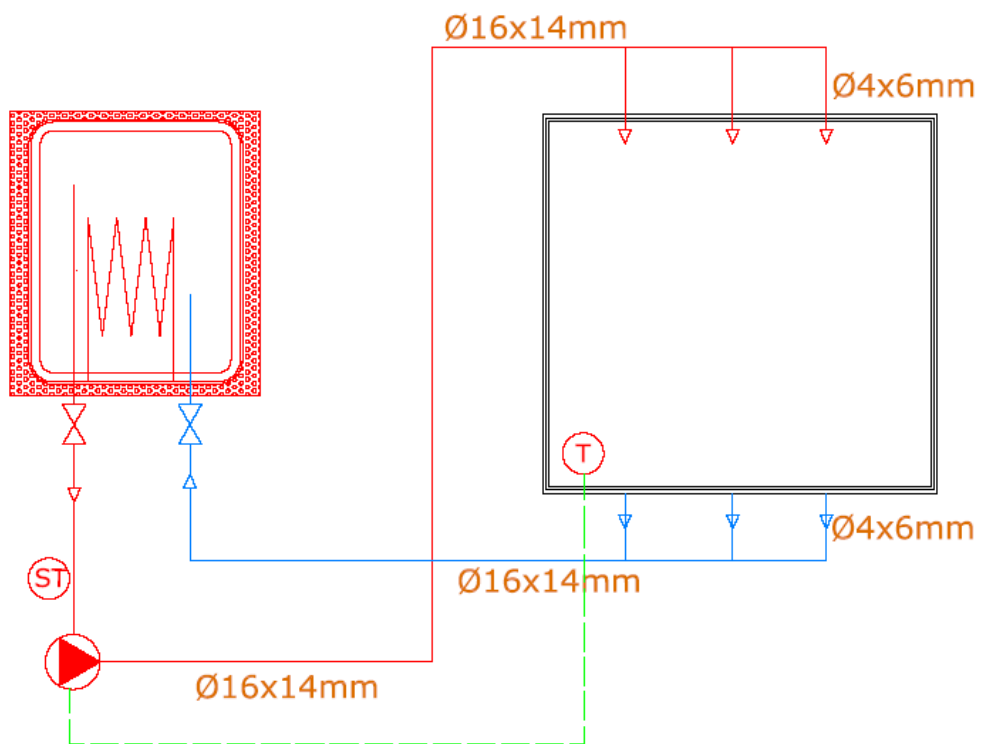


Fig. 7-34. Esquema de ejecución del ensayo con un solo circuito y sonda de temperatura intercalada en el circuito.

Se plantea repetir el ensayo intentando medir bien la temperatura del agua.

Finalmente se decide cambiar de lugar la sonda de temperatura y se introduce en el vidrio, como se ha comentado anteriormente en los ensayos a captación. El ensayo se ha completado con la introducción de un temporizador analógico hasta las 8 de la mañana, de modo que desconectara el termo eléctrico.

El procedimiento del ensayo se explica en el siguiente esquema.

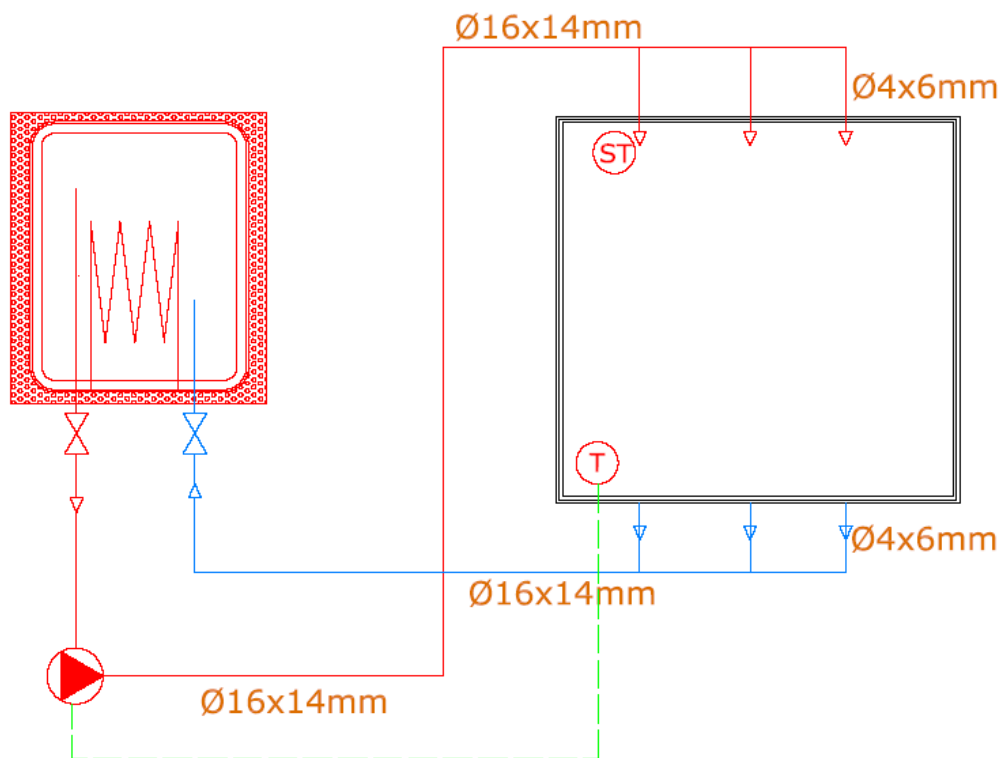


Fig. 7-35. Esquema de ejecución del ensayo con un solo circuito y sonda de temperatura introducida en la cámara.

La figura 7-36 muestra una fotografía de la ejecución del ensayo, donde se observa los conductos aislados y el temporizador conectado al termo eléctrico, con el fin de desconectarlo a las 8:00h de la mañana y evitar un consumo excesivo.



Fig. 7-36. Fotografía del procedimiento de ensayo donde se observan los conductos aislados.

Aunque el sistema de llenado y vaciado del vidrio está equilibrado, (tres conductos de llenado superiores y tres inferiores), al ser por gravedad el vaciado, es más rápido que el llenado, por lo que se propone para los siguientes ensayos una modificación en el sistema de llenado y vaciado del vidrio, dejando el llenado en tres conductos, y reduciendo el de vaciado de tres a dos o un conducto.

#### 7.6. CICLO DE ENSAYOS

En este punto se expondrán los resultados del ciclo de ensayos correspondientes realizados con el ensayo de las dos cámaras, expuestas anteriormente, tal y como a continuación se especifica.

Se han realizado un total de 65 ensayos, algunos de ellos tienen la duración de varios días, de los cuales 36 han sido de captación (54.6%), y 34 para pérdidas (53.1%), coincidiendo ambos (captación y pérdidas) en algunos ensayos. En total han resultado fallidos un total de 18 ensayos (26.5%), siendo principalmente los ensayos de pérdidas realizados con las cajas antiguas los que se han desestimado y otros que han dado diversos fallos.<sup>168</sup>

En este punto se interpretarán los resultados de los tres tipos de ensayos realizados por separado: ensayos de pérdidas de vidrios convencionales; ensayos de captación de vidrios convencionales y ensayos con cámara de agua, dentro del grupo de los dinámicos, analizados tanto en pérdidas como en ganancias.

<sup>168</sup> Ver estadillo de ensayos en Anexo 4. Metodología experimental: ensayos físicos. Ciclo de Ensayos. Estadillo de ensayos cajas nuevas.

Los ensayos de captación se han realizado durante el solsticio de verano, principalmente en orientación Este y Oeste, y excepcionalmente en orientación Sur, habiendo ensayado vidrios de control solar seleccionados como vidrios de máximas prestaciones por la empresa suministradora<sup>169</sup> (con denominación SS-20 y TS-30), un vidrio de cristal líquido y vidrios con cámara de agua.

Los ensayos de pérdidas se han realizado durante el solsticio de invierno, en periodo nocturno, habiendo ensayado vidrios bajo-emisivos con denominación (SUPER-E, AN-62 y DAG-30)<sup>170</sup> y vidrios con cámara de agua.

En el anexo 4: estadillo de ensayos se adjunta un estadillo de todos los ensayos realizados, incluyendo los válidos y los no válidos. Cada ensayo mencionado está referenciado numéricamente en dicha tabla.

#### **7.6.1. ENSAYOS A CAPTACIÓN**

A continuación se presentan los resultados de los ensayos a captación. Las orientaciones previas son Este y Oeste, ya que en el Sur el sol está demasiado alto y tiene una influencia menor sobre el acristalamiento, aunque se ha utilizado excepcionalmente para el análisis del vidrio de cristal líquido. De los 36 ensayos realizados a captación se han escogido 11 ensayos como los más representativos del fenómeno a estudiar. El resto de los ensayos se pueden ver en el Anexo 4: ciclo de ensayos.

Los vidrios preseleccionados para estos ensayos son dos tipos de vidrio de control solar (SS-20 y TS-30) de un fabricante nacional preseleccionados por poseer unas prestaciones más avanzadas en su producción.

En lo relativo a los vidrios dinámicos se ensayarán los vidrios con cámara de agua y vidrios de cristal líquido y se expondrán de manera análoga a como se va a proceder con los vidrios de control solar.

Se recuerda aquí que como ya se ha apuntado anteriormente, estos ensayos se han realizado con las cajas en su configuración inicial, es decir con el aislamiento de 4 cm., ya que fueron los primeros en hacerse y no se ha considerado necesario descartarlos y repetirlos, por lo que se han conservado tal cual se hicieron en su momento.

---

<sup>169</sup> La empresa suministradora de los vidrios se omite por deseo expreso de la misma.

<sup>170</sup> Ibid.



Las características de los vidrios analizados, según los datos cedidos por la empresa patrocinadora son:

Tabla 7-III. Tabla de características de los vidrios de control solar analizados.

	<b>Composición</b>	<b>Estructura de capas</b>	<b>Factor Solar</b>	<b>Transmisión luminosa</b>	<b>U</b>	<b>Transmisión energética</b>	<b>Reflexión energética</b>	<b>Absorción</b>
<b>TS-30</b>	6/12/6	Vidrio/capas de acero inoxidable y nitruro de titanio	29%	28%	2.7 W/m <sup>2</sup> K	20%	14%	66%
<b>SS-20</b>	6/12/6	Vidrio/capas de acero inoxidable y nitruro de titanio	22%	18%	2.6 W/m <sup>2</sup> K	13%	19%	68%

A la hora del análisis de los ensayos físicos de los vidrios convencionales, se dividirán en función de la orientación: Este y Oeste. Al lado de cada ensayo se especifica el número de ensayo, que corresponde con el estadillo. Los datos numéricos de los ensayos se pueden observar en el anexo 4: ciclo de ensayos correspondiente.

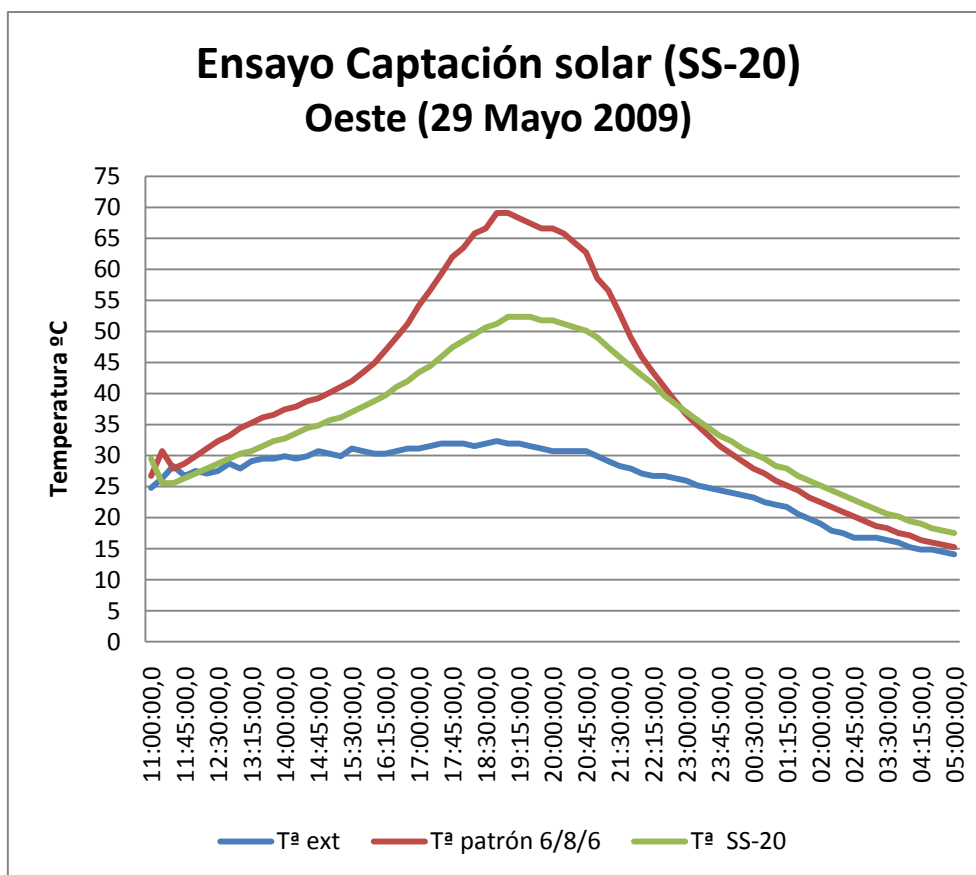
**7.6.1.1. ENSAYOS A OESTE. VIDRIOS DE CONTROL SOLAR**

**VIDRIO SS-20. ENSAYO Nº 15.**

Se trata del ensayo de un vidrio de control solar (SS-20) comparado con un doble acristalamiento común 6/8/6, realizado en orientación Oeste, en un día despejado, tomando mediciones cada 15 minutos durante todo un día, entre las 11:00 del día 29 de Mayo y las 5:00 del 30 Mayo de 2009.

Tal y como se puede observar en la gráfica adjunta, mientras que el doble acristalamiento (curva roja) alcanza los 70°C a las 19:00, el vidrio de control solar (curva verde) alcanza los 53°C. La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

Se aprecia que las ganancias solares en el vidrio patrón son muy superiores al vidrio de control solar reduciendo el vidrio de control solar la temperatura hasta 17°C.

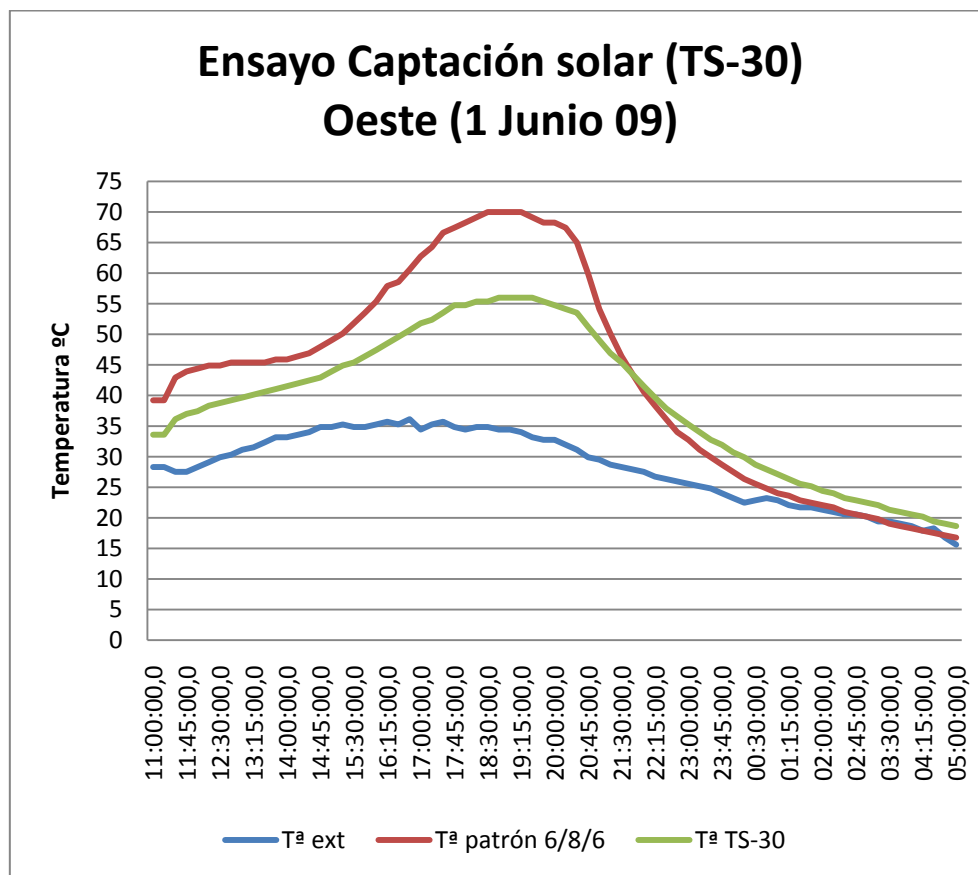


**VIDRIO TS-30. ENSAYO Nº 13.**

Se trata del ensayo de un vidrio de control solar (TS-30) comparado con un doble acristalamiento común 6/8/6, realizado en orientación Oeste, en un día despejado, tomando mediciones cada 15 minutos durante todo un día, entre las 11:00 del día 1 de Junio y las 5:00 del 2 de Junio de 2009.

Tal y como se puede observar en la gráfica adjunta, mientras que el doble acristalamiento (curva roja) alcanza los 70°C a las 19:00, el vidrio de control solar alcanza los 56°C (curva verde). La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

Se aprecia que las ganancias solares en el vidrio patrón son superiores al vidrio de control solar reduciendo el vidrio de control solar la temperatura hasta 14°C.



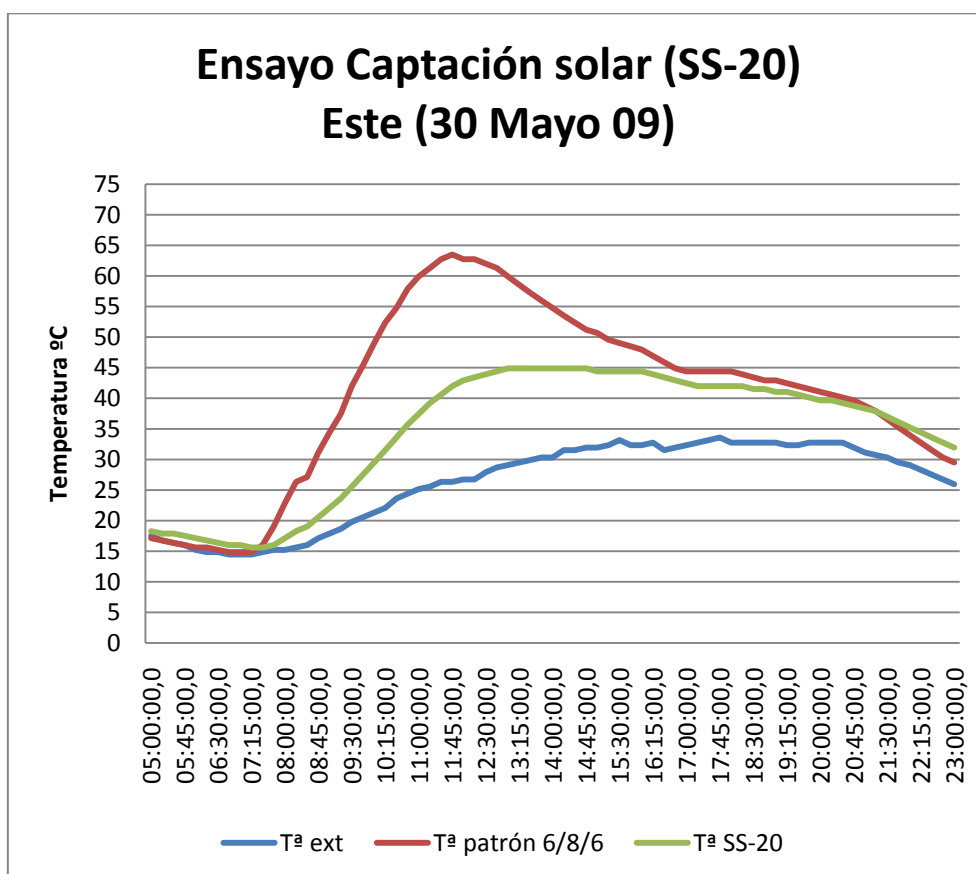
**7.6.1.2. ENSAYOS A ESTE. VIDRIOS CONVENCIONALES**

**VIDRIO SS-20. ENSAYO Nº 16.**

Se trata del ensayo de un vidrio de control solar (SS-20) comparado con un doble acristalamiento común 6/8/6, realizado en orientación Este, en un día despejado, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche y día y medio, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 5:00 y las 23:00 del 30 de Mayo.

Tal y como se puede observar en la gráfica adjunta, mientras que el doble acristalamiento (curva roja) alcanza los 63°C a las 11:00, el vidrio de control solar alcanza los 45°C (curva verde). La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

Se aprecia que las ganancias solares en el vidrio patrón son muy superiores al vidrio de control solar reduciendo el vidrio de control solar la temperatura hasta 18°C.

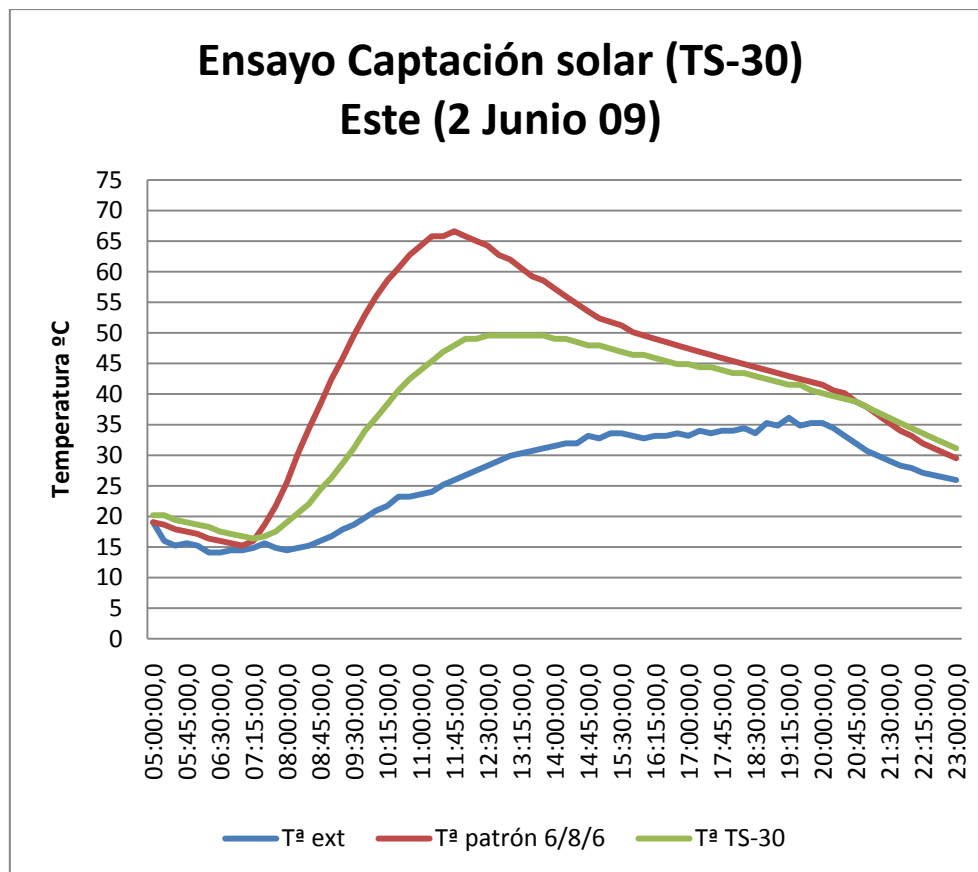


**VIDRIO TS-30. ENSAYO Nº 14.**

Se trata del ensayo de un vidrio de control solar (TS-30) comparado con un doble acristalamiento común 6/8/6, realizado en orientación Este, en un día despejado, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche y dos días, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 5:00 y las 23:00 del 2 de Junio de 2009.

Tal y como se puede observar en la gráfica adjunta, mientras que el doble acristalamiento (curva roja) alcanza los 66°C a las 11:15, el vidrio de control solar alcanza los 50°C (curva verde). La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

Se aprecia que las ganancias solares en el vidrio patrón son muy superiores al vidrio de control solar reduciendo el vidrio de control solar la temperatura hasta 16°C.



#### **VIDRIO CRISTAL LÍQUIDO (LCD). ENSAYO Nº 17.**

A pesar de que a priori ya se conoce que las prestaciones de un vidrio de cristal líquido a captación no superan a las de un vidrio convencional de control solar, se ha realizado este ensayo gracias a la disposición de una muestra cedida por una empresa nacional<sup>171</sup>. Debido a que esta muestra no tenía las dimensiones exactas del ensayo se modificó ligeramente el mismo para poder llevarlo a cabo. Estas modificaciones consisten esencialmente en añadir unos tableros de contrachapado de okume a la muestra hasta alcanzar la medida requerida (61.5x61.5cm) para poder instalarlo en la caja de ensayo. De manera análoga se ha cortado un vidrio sencillo de 6mm (vidrio patrón) a la medida de la muestra (59x39cm), haciendo un montaje similar. El vidrio de cristal líquido se ha ensayado en su estado apagado que es el de menos transmisión luminosa.

Dado que el resultado de este ensayo no se considera crucial para las conclusiones de la tesis se realizó en marzo para poder liberar las fechas del solsticio de verano para otros ensayos.

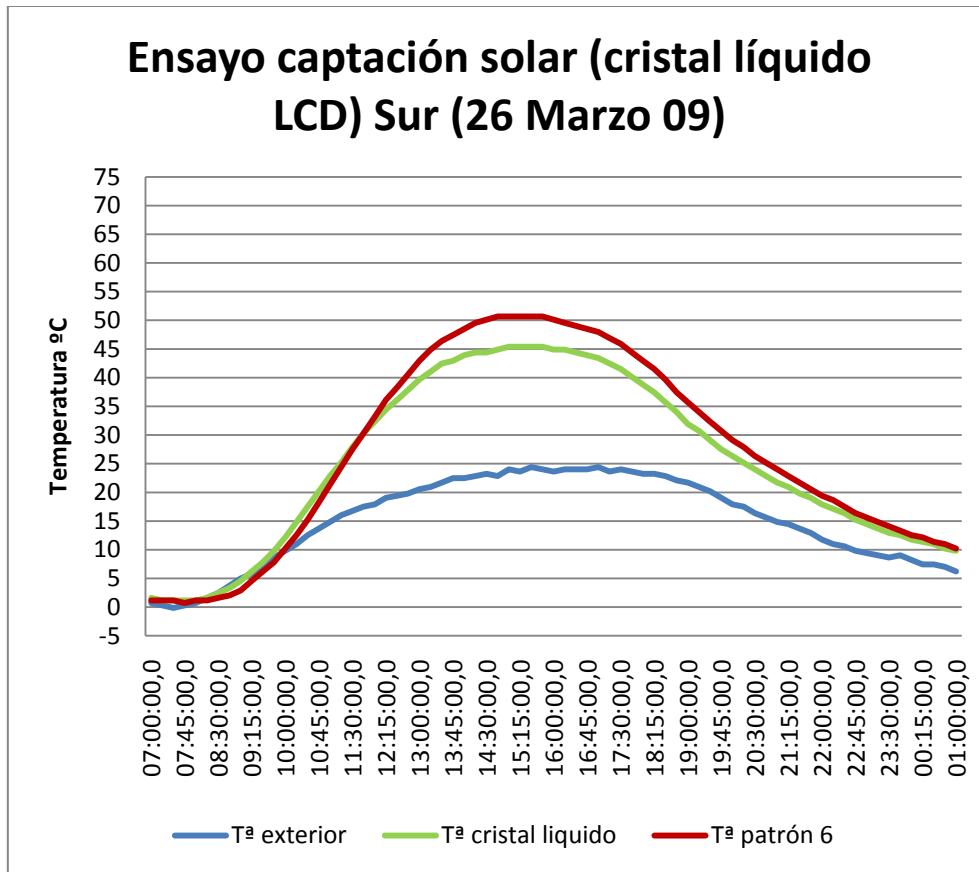
Ensayo realizado en orientación Sur, durante un día completo y dos medios días, tomando mediciones cada 15 minutos, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 7:00 del 26 de Marzo de 2009 y las 1:00 del 27 de Marzo de 2009.

Tal y como se puede observar en la gráfica adjunta, mientras que el doble acristalamiento (curva roja) alcanza los 50°C a las 15:15, el vidrio de control solar alcanza los 45°C (curva verde). La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

Se aprecia que las ganancias solares en el vidrio patrón son ligeramente superiores al vidrio de cristal líquido en su estado apagado reduciendo el vidrio de control solar la temperatura hasta 5°C.

---

<sup>171</sup> Se omite el nombre de la empresa, por deseo expreso de la misma.



A continuación mostramos una fotografía del procedimiento del ensayo.



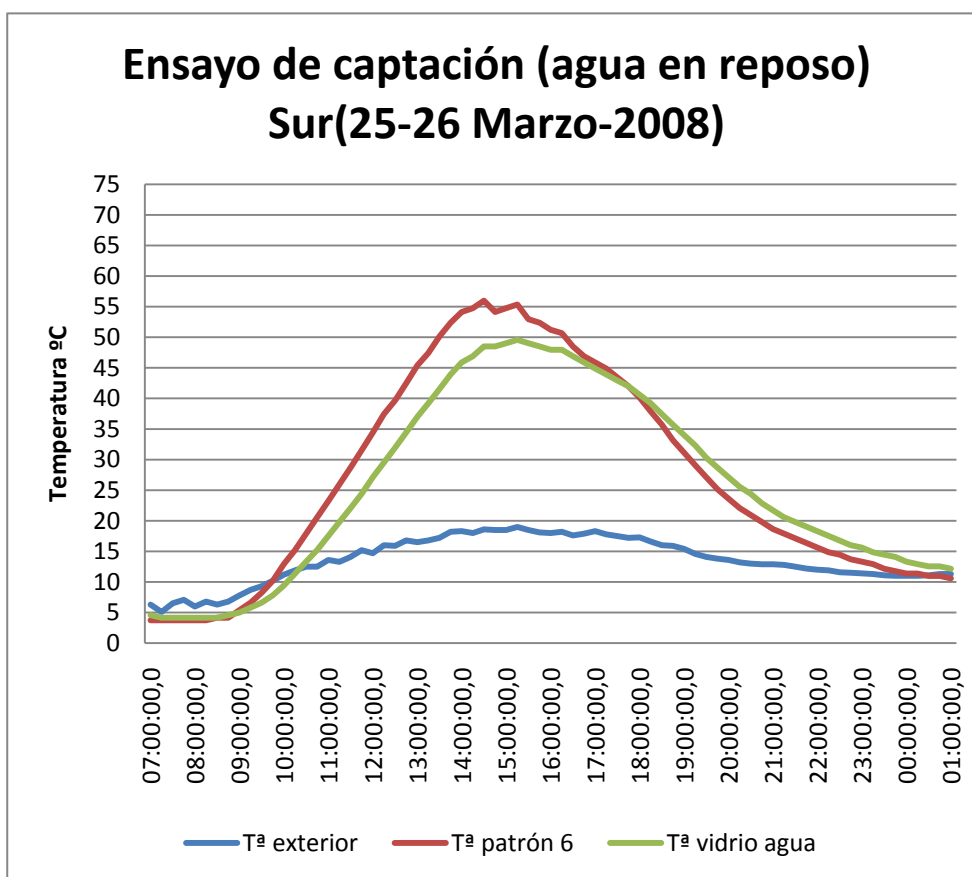
Fig. 7-37. Fotografía del procedimiento del ensayo.

**7.6.2. VIDRIOS CON CÁMARA DE AGUA.**

El interés de los ensayos realizados en el presente trabajo de investigación es comparar el comportamiento energético de un doble acristalamiento (4+4 / 8 agua / 4+4) con cámara de agua en circulación y sellado con silicona estructural, dispuesto en la caja de ensayo A, con el patrón compuesto inicialmente por un vidrio sencillo de 6mm y posteriormente por un doble acristalamiento común (6 / 8 aire / 6) con cámara de aire, dispuesto en la caja B.

**ENSAYO DE VIDRIO CON CÁMARA DE AGUA EN REPOSO. ENSAYO 1.**

Se trata del ensayo de un vidrio con un acristalamiento con cámara de agua en reposo comparado con un vidrio sencillo, realizado en orientación Sur, en un día despejado, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche y dos días, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 7:00 del día 25 y las 1:00 del 26 de Marzo de 2008, de entre los 8 días que duró el ensayo. estos primeros ensayos se realizaron durante los días 24-31 de Marzo de 2008 y su funcionamiento ha quedado descrito en el punto 7.5.1.: funcionamiento del ensayo a captación.



Tal y como se puede observar en la gráfica adjunta, mientras que el vidrio sencillo (curva roja) alcanza los 55°C a las 15:00, el vidrio con cámara de agua alcanza



prácticamente los 50°C (curva verde). La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

Se aprecia que las ganancias solares en el vidrio patrón son ligeramente superiores al vidrio con cámara de agua, reduciendo el vidrio con cámara de agua la temperatura hasta 5°C.

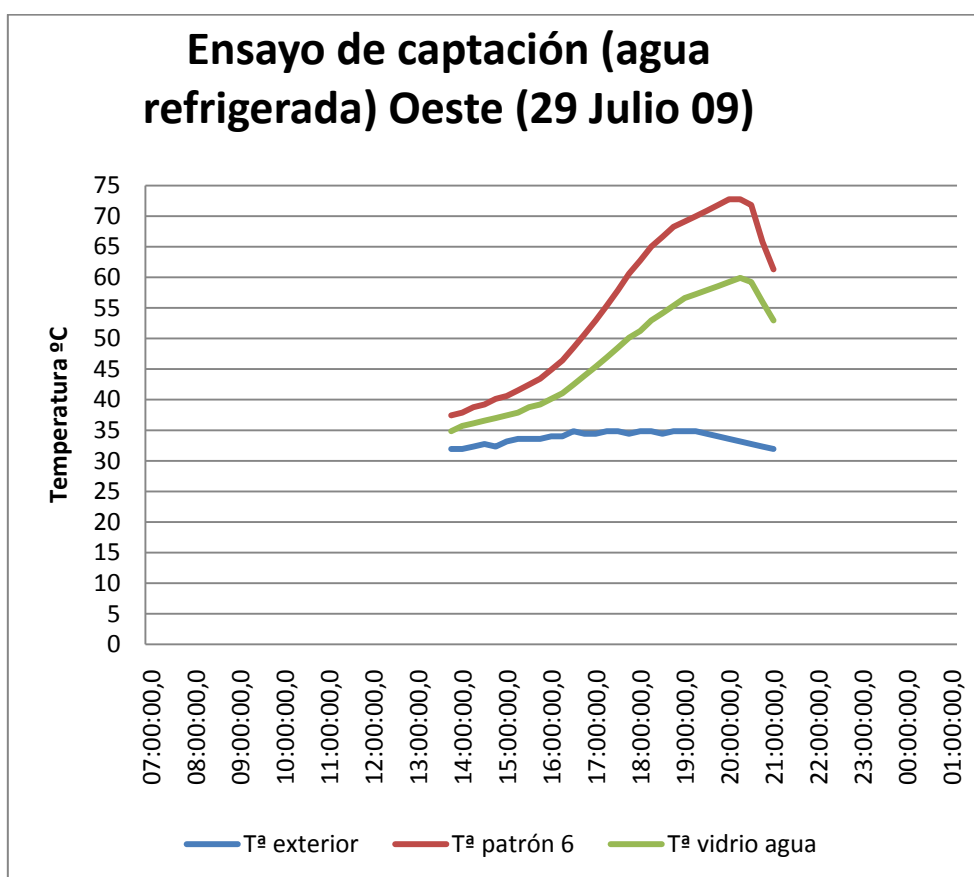
Se han realizado ensayos similares, que se adjuntan en el Anexo 4: Estadillo de ensayos y ciclo de ensayos. Ensayo 1.

**ENSAYOS AGUA REFRIGERADA EN CIRCULACIÓN RADIADOR PEQUEÑO (VARIANTE A).  
ENSAYO 7**

Se trata del ensayo de un vidrio con un acristalamiento con cámara de agua refrigerada mediante un radiador pequeño (variante a) comparado con un vidrio sencillo, realizado en orientación Oeste, en un día despejado, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche y dos días, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 14:00 y las 21:00 del 29 de Julio de 2009. Su funcionamiento ha quedado descrito en el punto 5: funcionamiento del ensayo a captación.

Tal y como se puede observar en la gráfica adjunta, mientras que el vidrio sencillo (curva roja) alcanza los 73°C a las 20:30, el vidrio con cámara de agua alcanza prácticamente los 55°C (curva verde). La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

Se aprecia que las ganancias solares en el vidrio patrón son sensiblemente superiores al vidrio con cámara de agua, reduciendo el vidrio con cámara de agua la temperatura hasta 18°C.



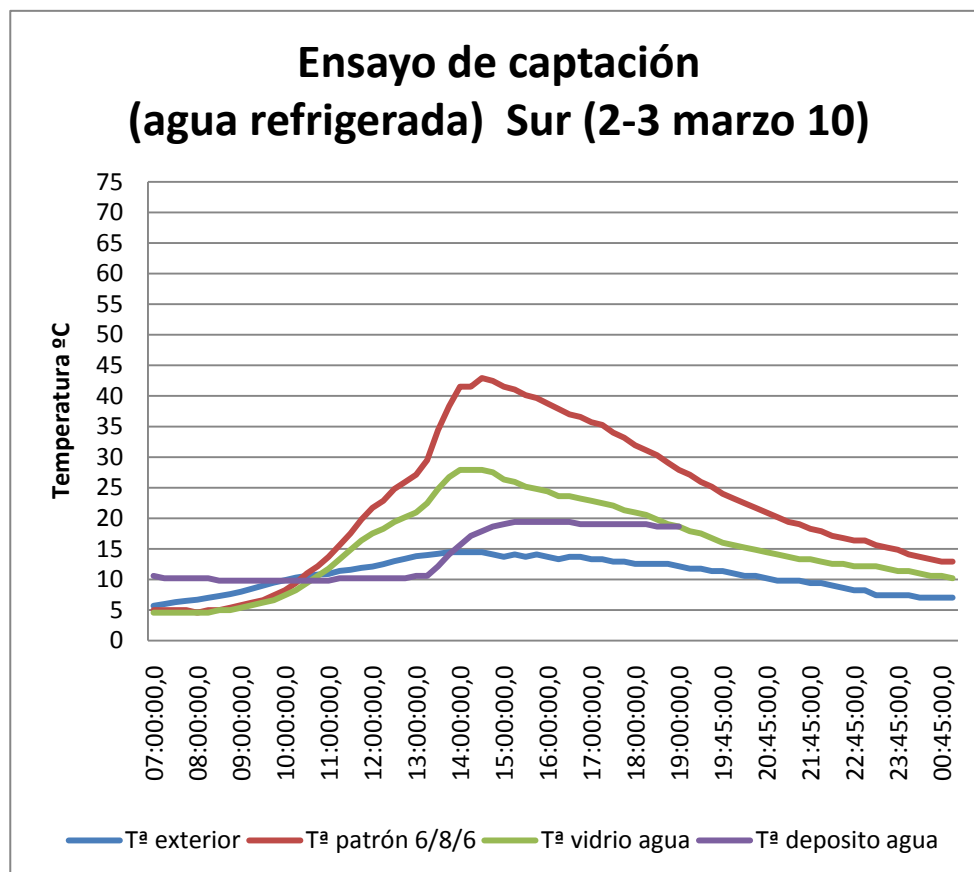
Se han realizado ensayos similares, que se adjuntan en el Anexo 4: Ciclo de ensayos. Ver ensayos: 3, 7, 8, 9, 11.

**ENSAYO AGUA REFRIGERADA EN CIRCULACIÓN RADIADOR PEQUEÑO (VARIANTE B).  
ENSAYO 46**

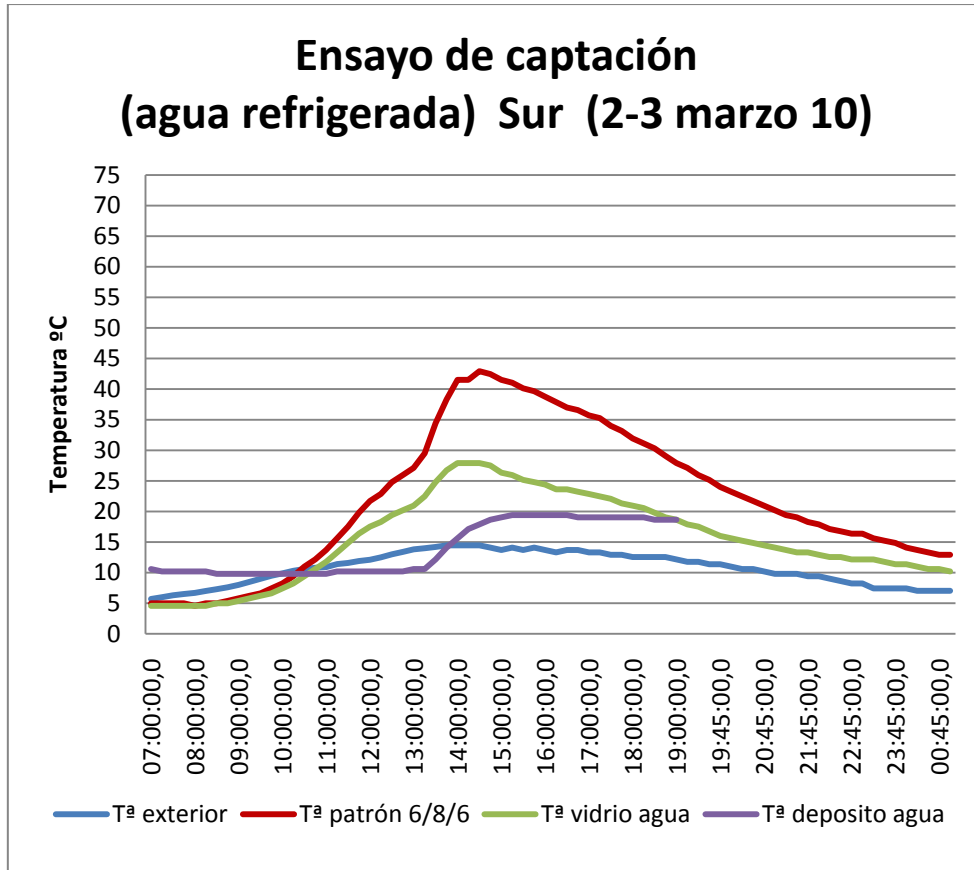
Se trata del ensayo de un vidrio con un acristalamiento con cámara de agua refrigerada mediante un radiador pequeño (variante b) comparado con un doble acristalamiento (6/8/6), realizado en orientación Sur, en un día despejado, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche y dos días, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 7:00 del 2 y las 1:00 del 3 de Marzo de 2010. Su funcionamiento ha quedado descrito en el punto 5: funcionamiento del ensayo a captación.

Tal y como se puede observar en la gráfica adjunta, mientras que el vidrio sencillo (curva roja) alcanza los 43°C a las 14:30, el vidrio con cámara de agua alcanza prácticamente los 27°C (curva verde). La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

Se aprecia que las ganancias solares en el vidrio patrón son sensiblemente superiores al vidrio con cámara de agua, reduciendo el vidrio con cámara de agua la temperatura hasta 16°C.

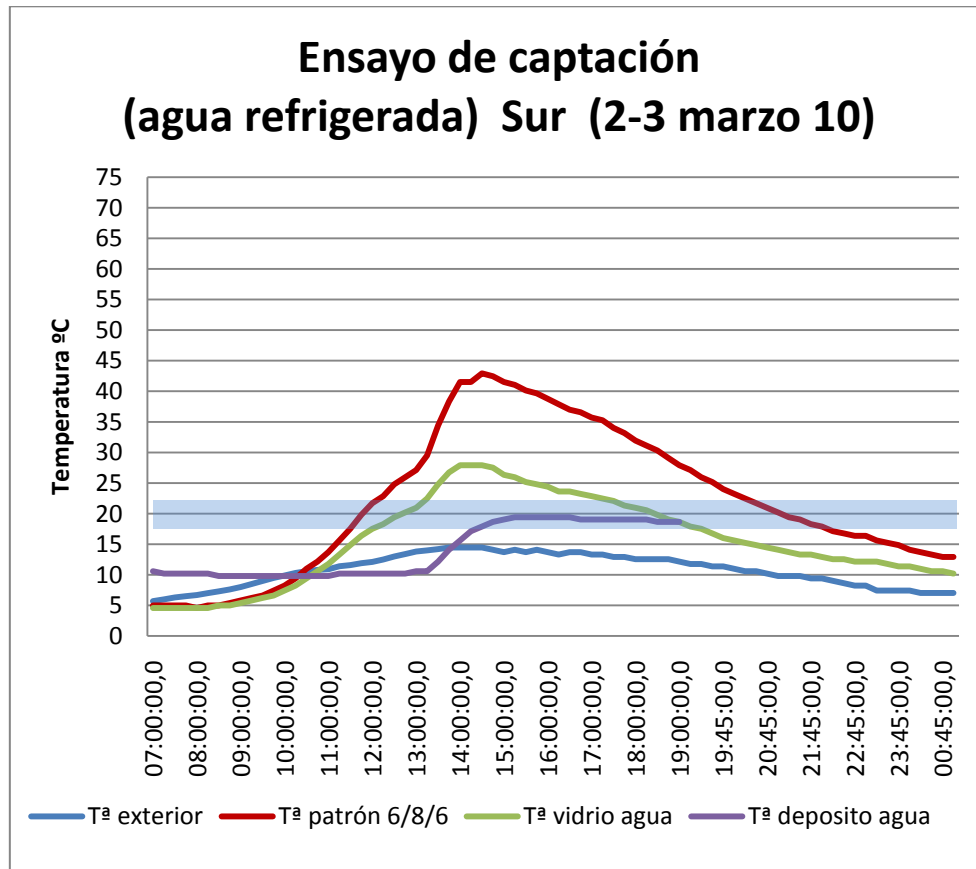


En este ensayo se planteaba observar si la temperatura ganada por el agua durante el día, podría ser aprovechable para su uso durante la noche, utilizando un termostato y fijando la temperatura de consigna en 25°C. En la siguiente gráfica se observa como la temperatura del agua (línea morada) asciende de unos 10°C a las 13:00 h a unos 20°C, a las 15:30h.



Se comprueba con el ensayo físico el poder de absorción energética del agua sin aportación de energía extra, por lo que se cree que si se introduce un radiador de características y dimensiones mayores al utilizado, se superen las expectativas. Por otro lado, se busca un control domótico del mismo con el fin de controlar el accionamiento de la bomba en los momentos que sea necesario.

En la siguiente gráfica se observa como el vidrio con agua se va acercando a la zona de confort establecida como una banda en azul entre los 18 y los 22°C.

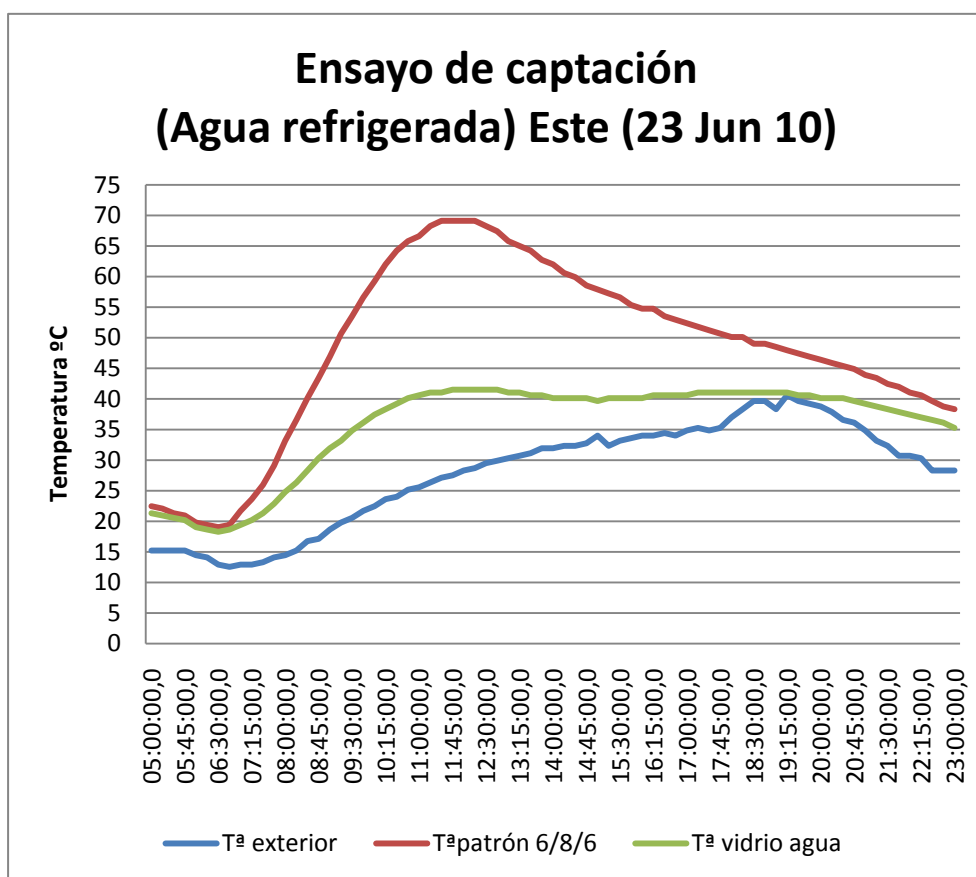


**ENSAYO AGUA REFRIGERADA EN CIRCULACIÓN CON RADIADOR MEDIANO CON VENTILADOR. ENSAYO 52**

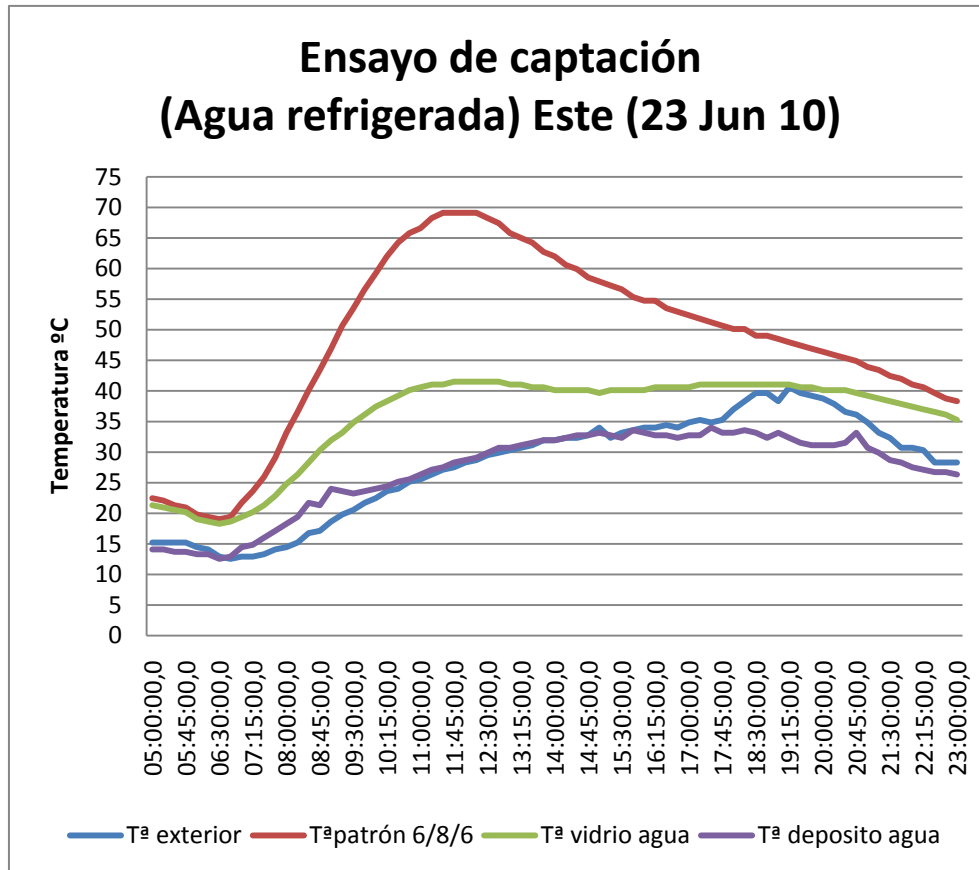
Se trata del ensayo de un vidrio con un acristalamiento con cámara de agua refrigerada mediante un radiador mediano con ventilador incorporado comparado con un doble acristalamiento (6/8/6), realizado en orientación Este, en un día despejado, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche y dos días, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 5:00 del 22 y las 23:00 del 23 de Junio de 2010. Su funcionamiento ha quedado descrito en el punto 5: funcionamiento del ensayo a captación.

Tal y como se puede observar en la gráfica adjunta, mientras que el vidrio sencillo (curva roja) alcanza los 70°C a las 11:30, el vidrio con cámara de agua alcanza prácticamente los 42°C (curva verde). La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

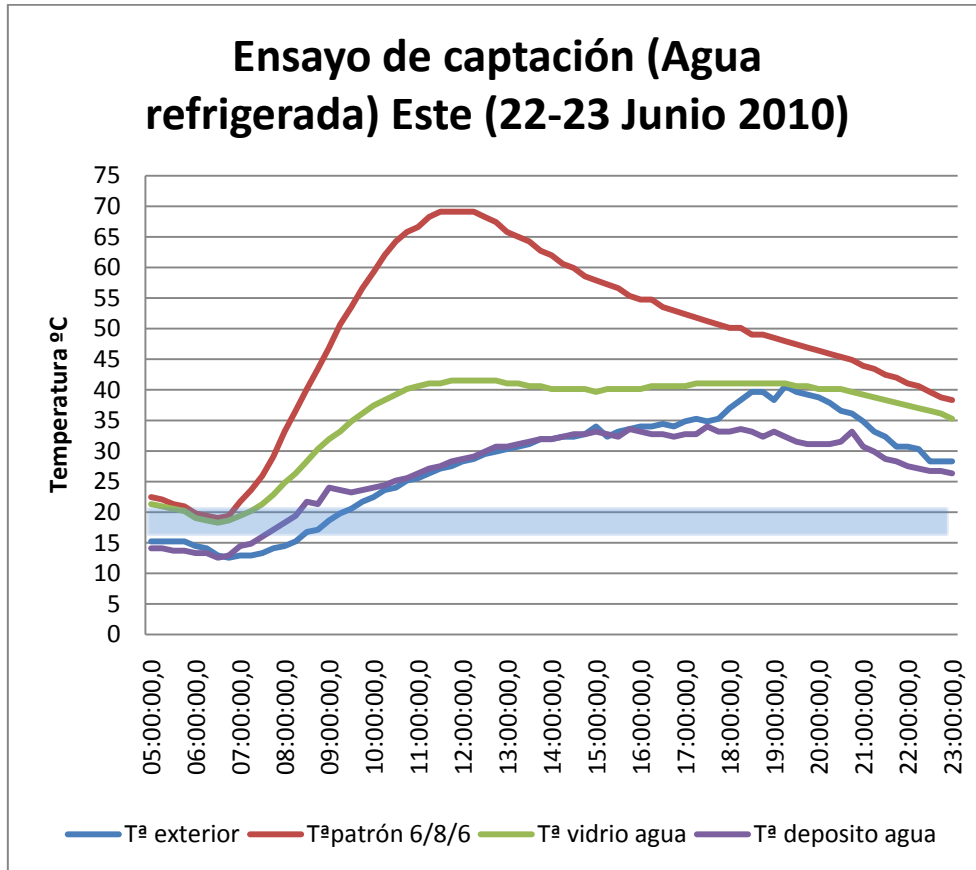
Se aprecia que las ganancias solares en el vidrio patrón son muy superiores al vidrio con cámara de agua, reduciendo el vidrio con cámara de agua la temperatura hasta 28°C.



En la siguiente gráfica se observa como la temperatura del agua se mantiene en todo momento gracias al radiador a la par de la temperatura exterior, principalmente en las horas más cruciales (entre las 10 y las 14h) y como en algunos tramos (entre las 17 y las 21h) por debajo de la exterior.



En la siguiente imagen tratada, se observa la diferencia de temperatura entre el vidrio con cámara de aire y el vidrio con cámara de agua, manteniendo en todo momento la transparencia, y como el vidrio con cámara de agua se va acercando a la temperatura de confort (azul) establecida entre los 22 y 26°C.



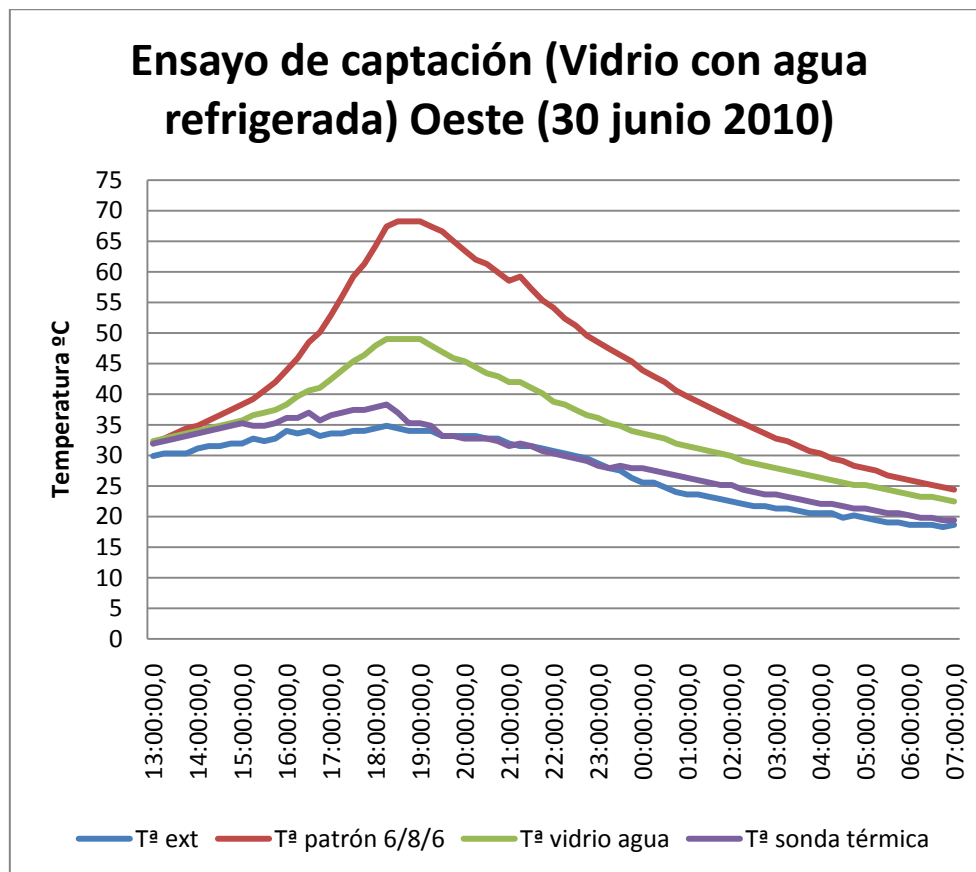


A continuación reproducimos el ensayo número 57, de ejecución análoga al anterior pero en orientación Oeste.

Se trata del ensayo de un vidrio con un acristalamiento con cámara de agua refrigerada mediante un radiador mediano con ventilador incorporado comparado con un doble acristalamiento (6/8/6), realizado en orientación Oeste, en un día despejado, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche y dos días, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 13:00 del 30 y las 07:00 del 1 de Julio de 2010. Su funcionamiento ha quedado descrito en el punto 7.5.1: funcionamiento del ensayo a captación.

Tal y como se puede observar en la gráfica adjunta, mientras que el vidrio sencillo (curva roja) alcanza los 68°C a las 11:30, el vidrio con cámara de agua alcanza prácticamente los 50°C (curva verde). La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

Se aprecia que las ganancias solares en el vidrio patrón son muy superiores al vidrio con cámara de agua, reduciendo el vidrio con cámara de agua la temperatura hasta 18°C.



### 7.6.3. ENSAYOS A PÉRDIDAS

Estudiaremos a continuación los distintos vidrios bajo-emisivos estudiados (SUPER-E, AN-62, DAG-30). Se omite la orientación puesto que son ensayos realizados durante la noche. Paralelamente se ha realizado un estudio de captación de dichos vidrios en orientación Sur.

Los ensayos se han realizado como se ha dicho anteriormente con las cajas nuevas.

Para los ensayos a pérdidas distinguiremos entre vidrios a cara 2 y cara 3.

Las características de los vidrios analizados, según los datos suministrados por la empresa patrocinadora son:

Tabla 7-IV. Tabla de características de los vidrios bajo emisivos analizados.

	Composición	Estructura de capas	Factor Solar	Transmisión luminosa	U	Transmisión energética	Reflexión energética	Absorción
<b>SUPER-E</b>	6/12/6	Vidrio/MeOx/Ag/barrera/MeOx	56%	73%	1.7 W/m <sup>2</sup> K	49%	20%	32%
<b>AN-62</b>	6/12/6	Vidrio/MeOx/Ag/barrera/MeOx	43%	62%	1.7 W/m <sup>2</sup> K	37%	27%	36%
<b>DAG-30</b>	6/12/6	Vidrio/MeOx/Ag/barrera/MeOx/Ag/barrera/MeOx	18%	27%	1.76 W/m <sup>2</sup> K	13%	33%	53%

### 7.6.3.1. ENSAYOS A PÉRDIDAS VIDRIOS BAJO-EMISIVOS

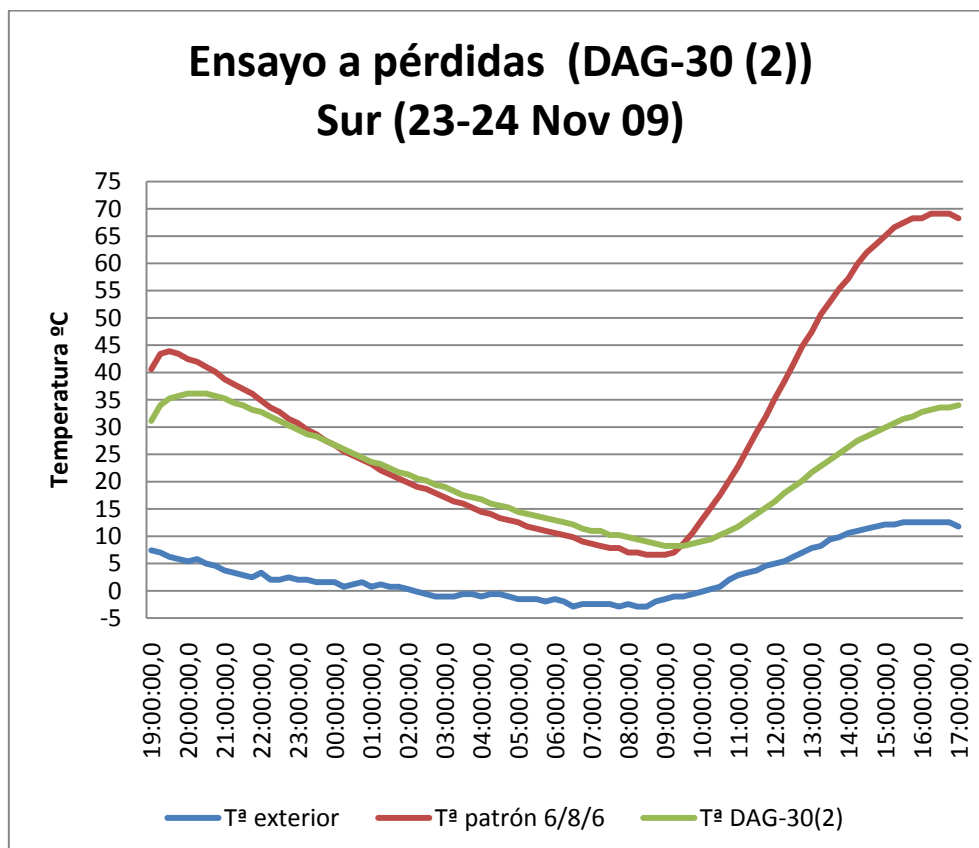
#### VIDRIO DAG-30 CARA 2. ENSAYO 61

Se trata de un ensayo a pérdidas de un vidrio bajo emisor (DAG-30 cara 2) comparado con un doble acristalamiento común 6/8/6, realizado durante la noche principalmente en horas nocturnas introduciendo una probeta de hormigón calentada en horno del laboratorio de la ETSAM en ambas cajas, en un día despejado, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche y dos días, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 19:00 del día 23 y las 17:00h del 24 de Noviembre de 2009.

Durante el ensayo a pérdidas (entre las 18h y las 8:00), el DAG-30 en cara 2, según los datos proporcionados por la empresa, tiene mejor aislamiento o menor valor U que el patrón (1,76 frente a 3 W/m<sup>2</sup>K). Sin embargo no parece que la diferencia sea muy grande. En el punto interior de la gráfica la diferencia de temperatura entre ambos vidrios es de 1.5°C aproximadamente, lo cual parece muy poca diferencia.

Durante el ensayo a captación (entre las 8:00 y las 17:00h), mientras que el doble acristalamiento (curva roja) alcanza los 69°C a las 11:15, el vidrio bajo emisor alcanza los 34°C (curva verde). La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

De forma complementaria al ensayo de pérdidas se aprovecha para explorar el comportamiento de los vidrios bajo-emisivos a ganancias. Se aprecia que las ganancias solares en el vidrio patrón son muy superiores al vidrio bajo emisor reduciendo éste la temperatura hasta 35°C.



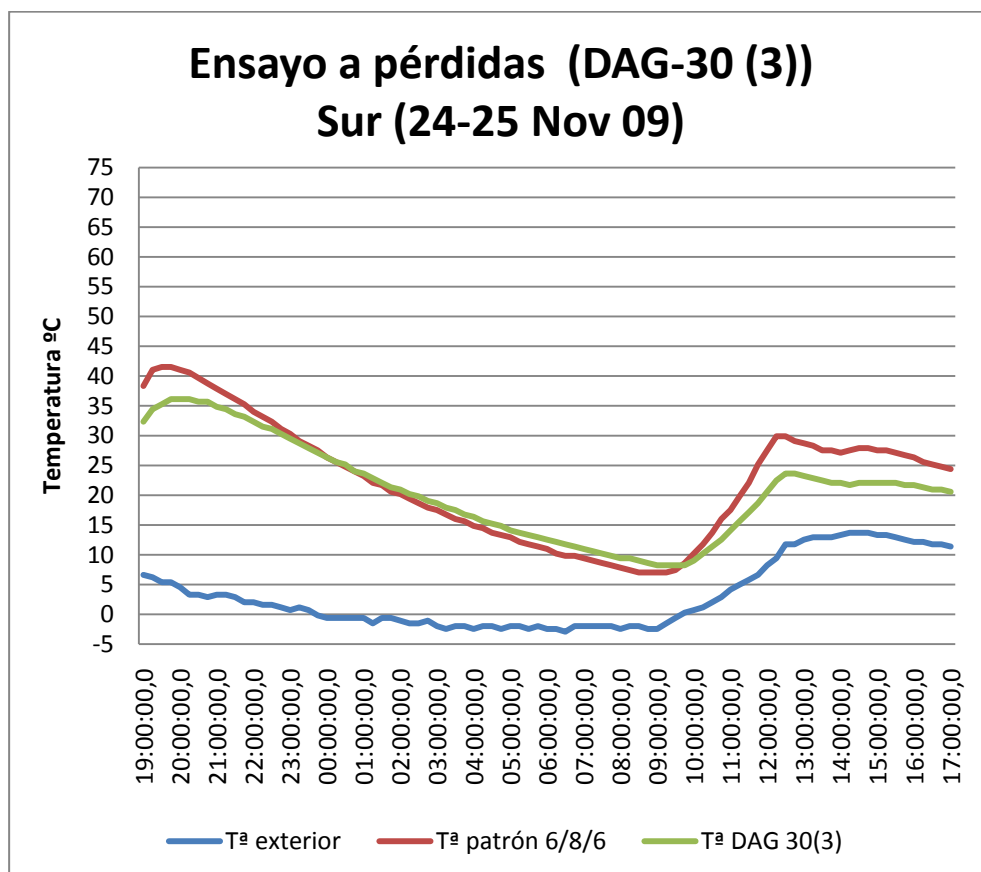
**VIDRIO DAG-30 CARA 3. ENSAYO 62.**

Se trata de un ensayo a pérdidas de un vidrio bajo emisor (DAG-30 cara 3) comparado con un doble acristalamiento común 6/8/6, realizado durante la noche principalmente en horas nocturnas introduciendo una probeta de hormigón calentada en horno del laboratorio de la ETSAM en ambas cajas, en un día nublado, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche y dos días, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 19:00 del día 24 y las 17:00h del 25 de Noviembre de 2009.

Durante el ensayo a pérdidas (entre las 18h y las 8:00), el DAG-30 en cara 3, según los datos proporcionados por la empresa, tiene mejor aislamiento o menor valor U que el patrón (1,76 frente a 3 W/m<sup>2</sup>K). Sin embargo no parece que la diferencia sea muy grande. En el punto interior de la gráfica la diferencia de temperatura entre ambos vidrios es de 1°C aproximadamente, lo cual parece muy poca diferencia.

Durante el ensayo a captación (entre las 8:00 y las 17:00h), mientras que el doble acristalamiento (curva roja) alcanza los 30°C a las 12:00, el vidrio bajo emisor alcanza los 23°C (curva verde). La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

De forma complementaria al ensayo de pérdidas se aprovecha para explorar el comportamiento de los vidrios bajo-emisivos a ganancias. Se aprecia que las ganancias solares en el vidrio patrón son superiores al vidrio bajo emisor reduciendo éste la temperatura hasta 7°C, en este caso debido a que el día estaba nublado.



**VIDRIO AN-62 CARA 2. ENSAYO 59**

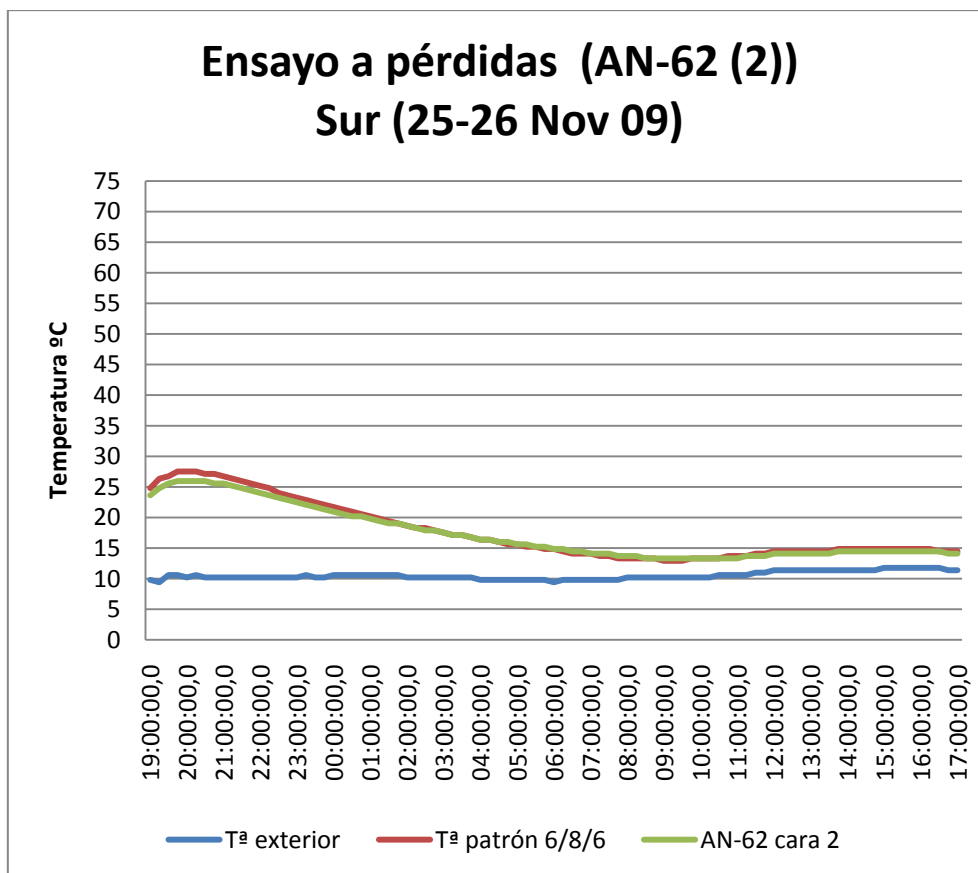
Se trata de un ensayo a pérdidas de un vidrio bajo emisivo (AN-62 cara 2) comparado con un doble acristalamiento común 6/8/6, realizado durante la noche principalmente en horas nocturnas introduciendo una probeta de hormigón calentada en horno del laboratorio de la ETSAM en ambas cajas, en un día nublado, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche y dos días, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 19:00 del día 25 y las 17:00h del 26 de Noviembre de 2009.

Durante el ensayo a pérdidas (entre las 18h y las 8:00), el AN-62 en cara 2, según los datos proporcionados por la empresa, tiene mejor aislamiento o menor valor U que el patrón (1,7 frente a 3 W/m<sup>2</sup>K). Sin embargo no parece que la diferencia sea muy grande. En el punto interior de la gráfica la diferencia de temperatura entre ambos vidrios es de 0.5°C aproximadamente, lo cual parece muy poca diferencia.

Durante el ensayo a captación (entre las 8:00 y las 17:00h), no se observan diferencias, por lo que se tomarán los del ensayo siguiente. La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

De forma complementaria al ensayo de pérdidas se aprovecha para explorar el comportamiento de los vidrios bajo-emisivos a ganancias.

En este caso no se aprecia ganancia alguna debido a que el día era nublado.



**VIDRIO AN-62 CARA 3. ENSAYO 60**

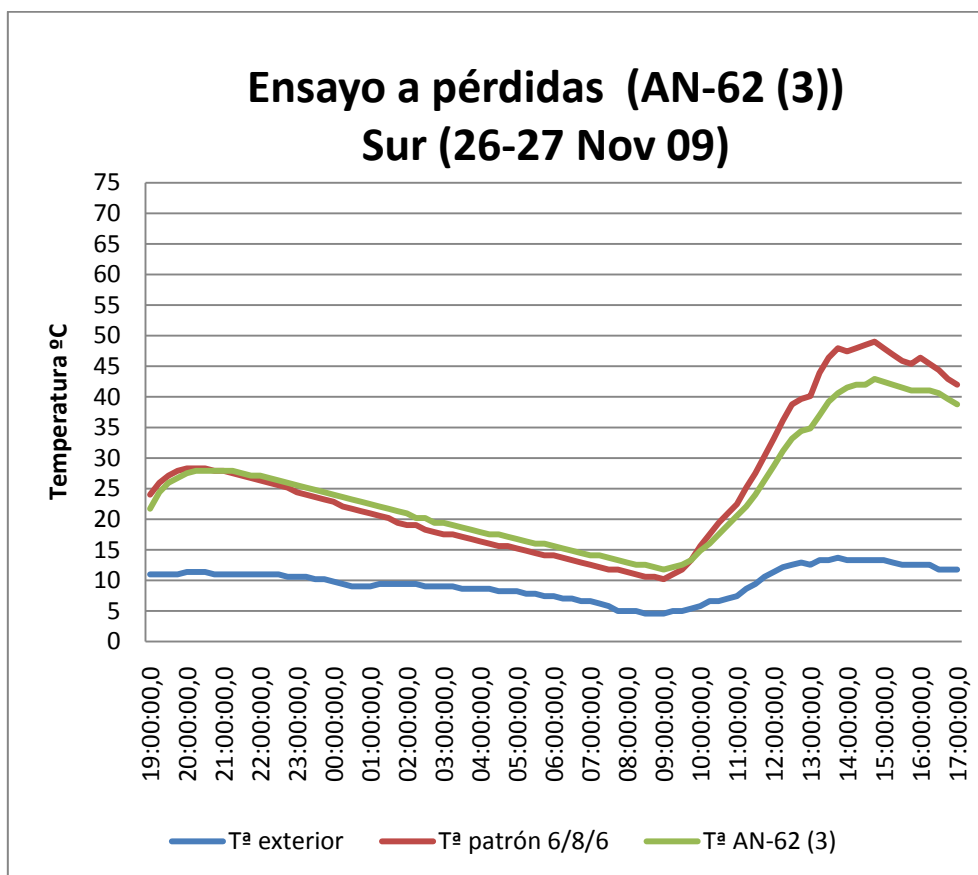
Se trata de un ensayo a pérdidas de un vidrio bajo emisivo (AN-62 cara 3) comparado con un doble acristalamiento común 6/8/6, realizado durante la noche principalmente en horas nocturnas introduciendo una probeta de hormigón calentada en horno del laboratorio de la ETSAM en ambas cajas, en un día soleado, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche y dos días, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 19:00 del día 26 y las 17:00h del 27 de Noviembre de 2009.

Durante el ensayo a pérdidas (entre las 18h y las 8:00), el AN-62 en cara 3, según los datos proporcionados por la empresa, tiene mejor aislamiento o menor valor U que el patrón (1,7 frente a 3 W/m<sup>2</sup>K). Sin embargo no parece que la diferencia sea muy grande. En el punto interior de la gráfica la diferencia de temperatura entre ambos vidrios es de 2°C aproximadamente, lo cual parece muy poca diferencia.

Durante el ensayo a captación (entre las 8:00 y las 17:00h), mientras que el doble acristalamiento (curva roja) alcanza los 49°C a las 14:00, el vidrio bajo emisivo alcanza los 43°C (curva verde). La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

De forma complementaria al ensayo de pérdidas se aprovecha para explorar el comportamiento de los vidrios bajo-emisivos a ganancias.

Se aprecia que las ganancias solares en el vidrio patrón son ligeramente superiores al vidrio bajo emisivo reduciendo éste la temperatura hasta 6°C.



**SUPER E CARA 2. ENSAYO 57**

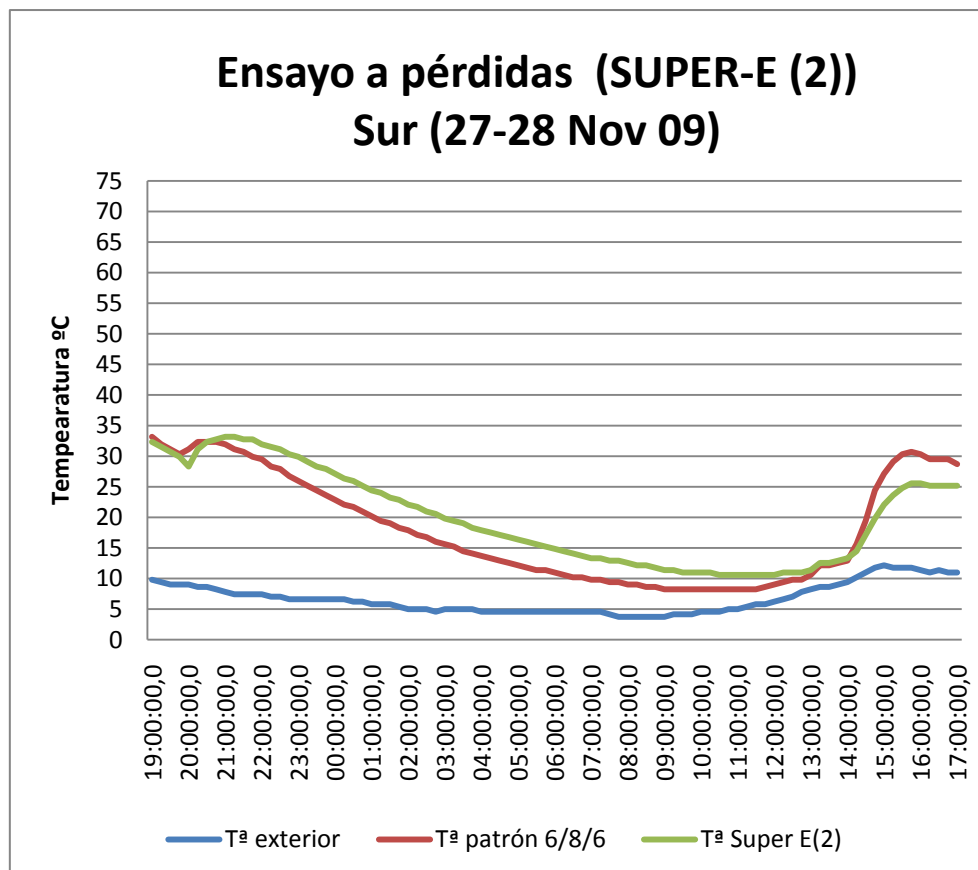
Se trata de un ensayo a pérdidas de un vidrio bajo emisivo (SUPER-E cara 2) comparado con un doble acristalamiento común 6/8/6, realizado durante la noche principalmente en horas nocturnas introduciendo una probeta de hormigón calentada en horno del laboratorio de la ETSAM en ambas cajas, en un día soleado, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche y dos días, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 19:00 del día 27 y las 17:00h del 28 de Noviembre de 2009.

Durante el ensayo a pérdidas (entre las 18h y las 8:00), el SUPER-E en cara 2, según los datos proporcionados por la empresa, tiene mejor aislamiento o menor valor U que el patrón (1,7 frente a 3 W/m<sup>2</sup>K). Sin embargo no parece que la diferencia sea muy grande. En el punto interior de la gráfica la diferencia de temperatura entre ambos vidrios es de 4°C aproximadamente, lo cual parece muy poca diferencia.

Durante el ensayo a captación (entre las 8:00 y las 17:00h), mientras que el doble acristalamiento (curva roja) alcanza los 31°C a las 16:00, el vidrio bajo emisivo alcanza los 25°C (curva verde). La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

De forma complementaria al ensayo de pérdidas se aprovecha para explorar el comportamiento de los vidrios bajo-emisivos a ganancias.

Se aprecia que las ganancias solares en el vidrio patrón son ligeramente superiores al vidrio bajo emisivo reduciendo éste la temperatura hasta 6°C.



**SUPER E CARA 3. ENSAYO 58**

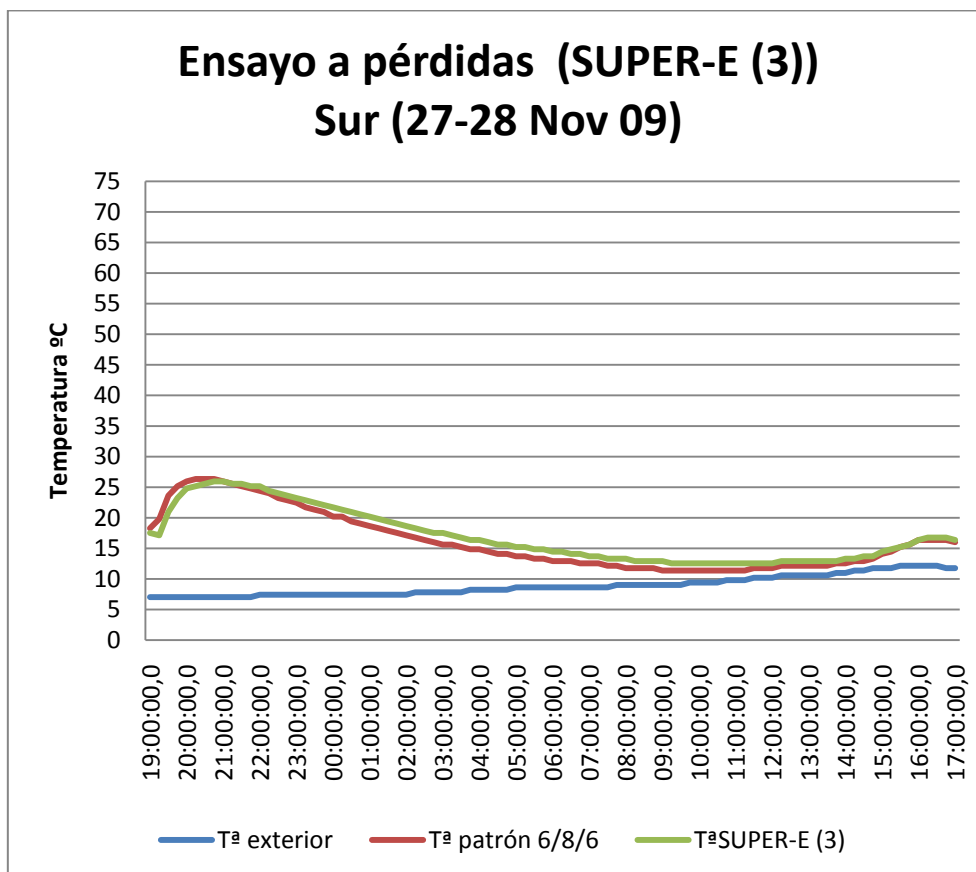
Se trata de un ensayo a pérdidas de un vidrio bajo emisivo (SUPER-E cara 3) comparado con un doble acristalamiento común 6/8/6, realizado durante la noche principalmente en horas nocturnas introduciendo una probeta de hormigón calentada en horno del laboratorio de la ETSAM en ambas cajas, en un día soleado, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche y dos días, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 19:00 del día 1 y las 17:00h del 2 de Diciembre de 2009.

Durante el ensayo a pérdidas (entre las 18h y las 8:00), el SUPER-E en cara 3, según los datos proporcionados por la empresa, tiene mejor aislamiento o menor valor U que el patrón (1,7 frente a 3 W/m<sup>2</sup>K). Sin embargo no parece que la diferencia sea muy grande. En el punto interior de la gráfica la diferencia de temperatura entre ambos vidrios es de 2°C aproximadamente, lo cual parece muy poca diferencia.

Durante el ensayo a captación (entre las 8:00 y las 17:00h), no se observan diferencias, por lo que se tomarán los del ensayo siguiente. La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

De forma complementaria al ensayo de pérdidas se aprovecha para explorar el comportamiento de los vidrios bajo-emisivos a ganancias.

En este caso no se aprecia ganancia alguna debido a que el día era nublado.



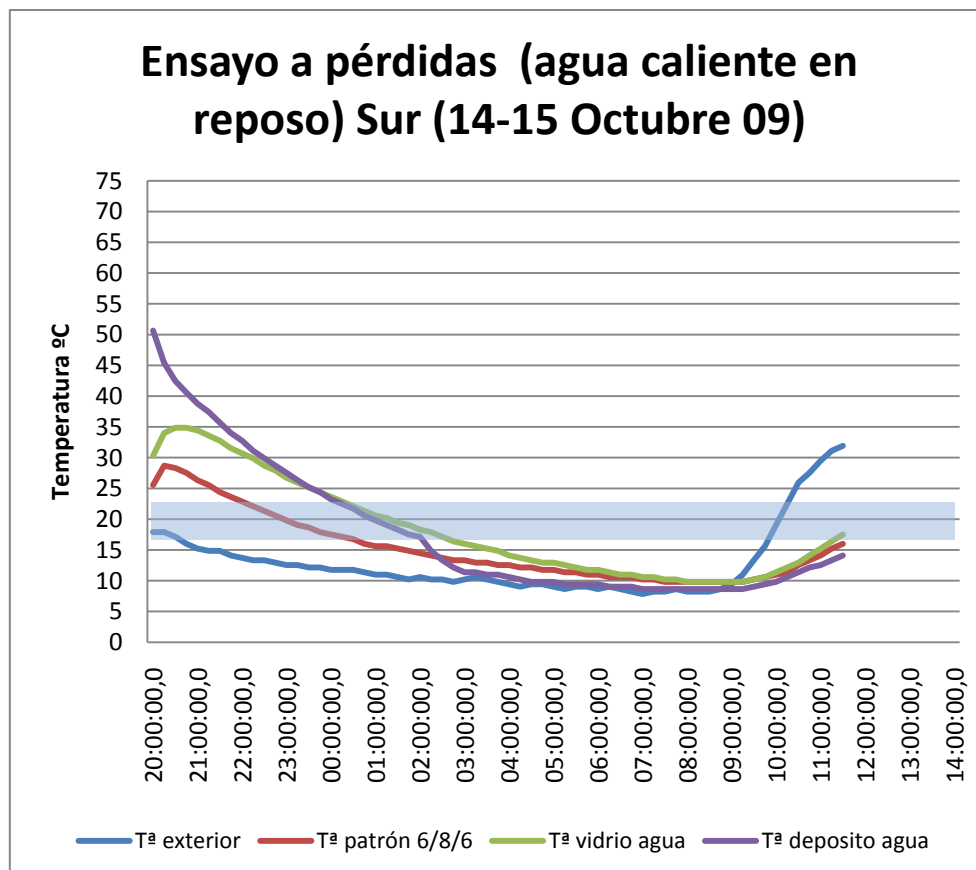


#### 7.6.4. VIDRIOS CON CÁMARA DE AGUA.

##### ENSAYO CON VIDRIO CON AGUA CALIENTE EN CIRCULACIÓN CONTINUA. ENSAYO 12.

Se trata del ensayo de un vidrio con un acristalamiento con cámara de agua caliente calentada en laboratorio comparado con un doble acristalamiento (6/8/6), realizado en orientación Sur, en un día despejado en periodo nocturno, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 20:00 del 14 y las 14:00 del 15 de Octubre de 2010. Su funcionamiento ha quedado descrito en el punto 5: funcionamiento del ensayo a pérdidas.

La gráfica muestra cómo durante el tiempo que se mantiene el agua caliente (línea morada) desde las 20.00 hasta las 02.00h, la temperatura de la caja con vidrio con agua (verde) se mantiene por encima del rango de confort hasta las 2.00h de la mañana, en el que empieza a descender rápidamente igualándose con la temperatura de la caja con vidrio con aire. La temperatura del vidrio con agua es superior al confort debido a la alta temperatura del agua (50°C). La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET. La caída brusca de temperatura del agua hacia las 2:30h, es debida a la rotura del vidrio por choque térmico. Se observa por la rotura del vidrio la conveniencia de la utilización de un vidrio laminar 4+4/8/4+4, con el fin de continuar con el ensayo sin pérdida de agua. Ver anexo 4: Fallos o averías comunes y procedimiento de resolución.

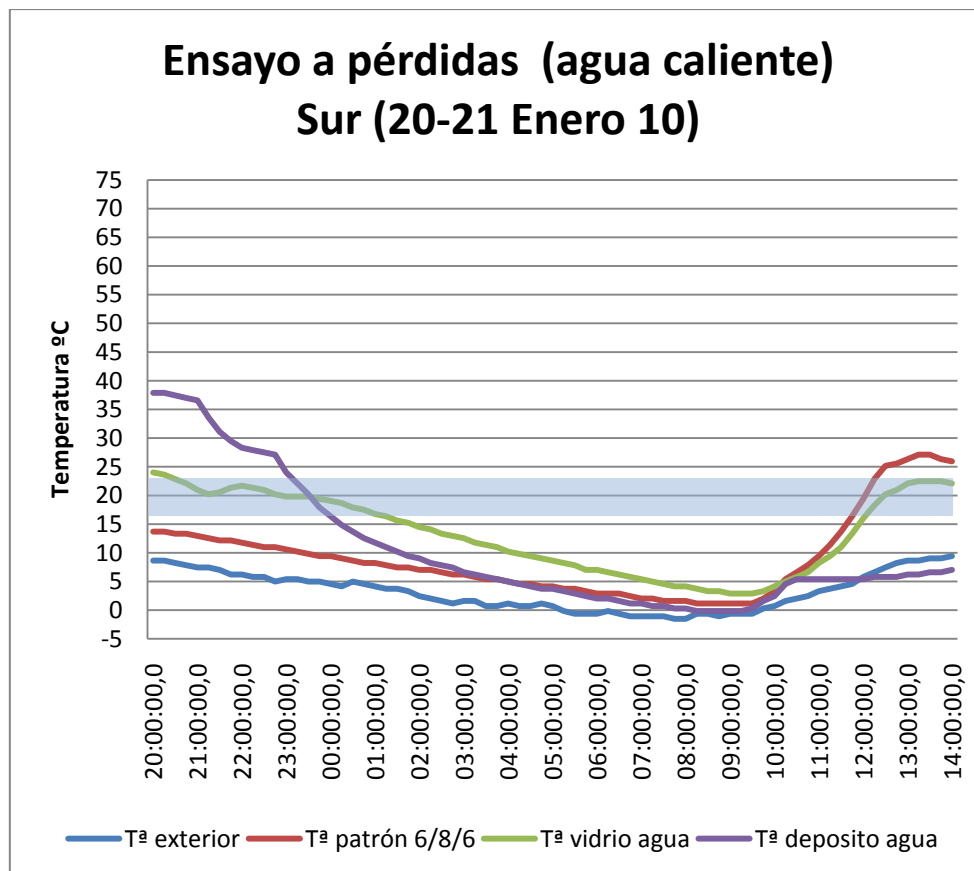


Para los próximos ensayos se plantea una mejora de los ensayos con el fin de la caracterización del ensayo durante toda la noche, no solo durante unas pocas horas. Entre otras se busca la mejora de las cajas con nuevo aislamiento al observarse pérdidas.

**ENSAYO CON VIDRIO CON CÁMARA DE AGUA CALIENTE EN CIRCUITO ABIERTO. ENSAYO 44.**

Se trata del ensayo de un vidrio con un acristalamiento con cámara de agua caliente en circuito abierto, comparado con un doble acristalamiento (6/8/6), realizado en orientación Sur, en un día despejado en periodo nocturno, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 20:00 del 20 y las 14:00 del 21 de Enero de 2010. Su funcionamiento ha quedado descrito en el punto 5: funcionamiento del ensayo a pérdidas. La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

La gráfica muestra cómo la temperatura del agua contenida en el depósito se muestra elevada al principio, descendiendo rápidamente. La temperatura de la caja donde se ha colocado el vidrio con agua (verde) consigue mantener del orden de los 20°C (franja azul), hasta que la temperatura del agua (morada) comienza a descender radicalmente y cruza la línea del vidrio con agua. A partir de ahí comienza a descender hasta juntarse con la exterior, prácticamente como ocurre con la del vidrio con aire (rojo) que desciende radicalmente. La diferencia de temperatura entre ambas cajas fue de 10°C, durante las horas en las que se mantuvo caliente el agua, posteriormente fue disminuyendo, llegando siempre a haber una diferencia de temperatura por encima de unos 2°C.



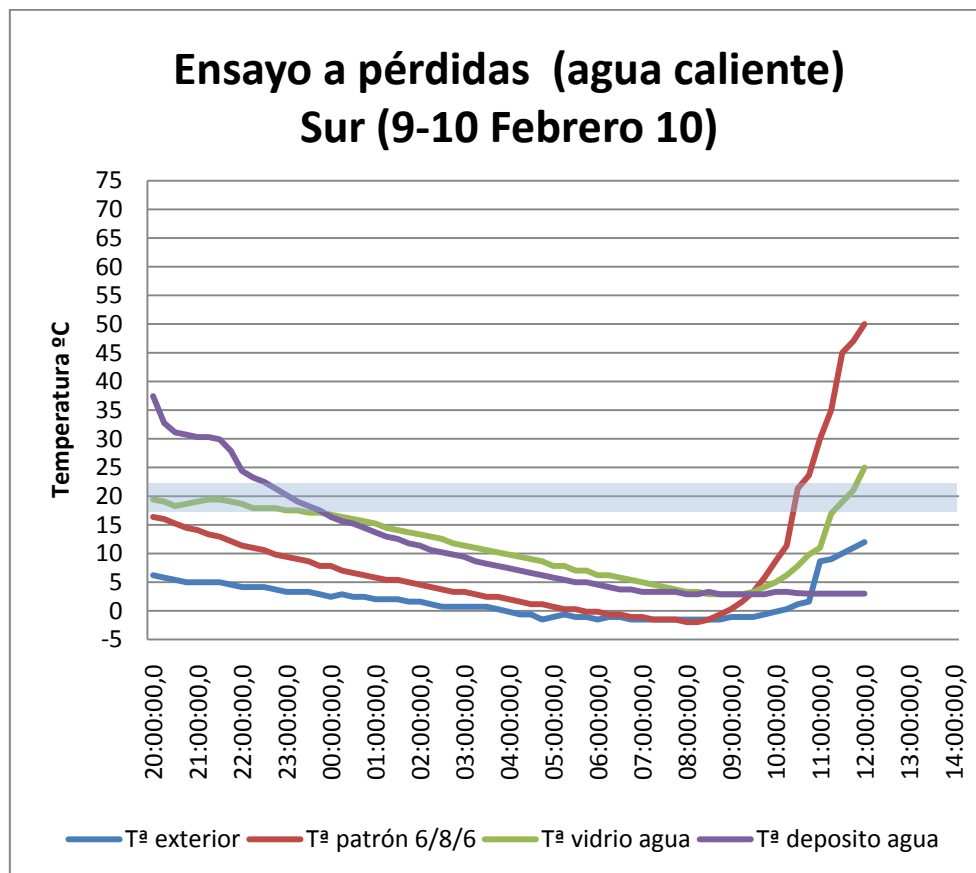
Aunque la bomba estaba funcionando por la mañana, debido a que la temperatura del interior del vidrio con agua (verde) estaba por debajo de la temperatura de consigna del termostato, no consiguió mantener la temperatura de confort (en el rango de la franja azul) debido a la caída de la temperatura del agua del depósito.

El vidrio no tenía fugas, pero había pérdidas de agua, debidas principalmente a que no había un circuito cerrado. Se propone volver a repetir el ensayo cerrando el circuito mediante la introducción del radiador pequeño en el termotanque.

**ENSAYO 45. ENSAYO CON VIDRIO CON CÁMARA DE AGUA CALIENTE EN CIRCUITO CERRADO.**

Se trata del ensayo de un vidrio con un acristalamiento con cámara de agua caliente calentada en laboratorio y en circuito cerrado comparado con un doble acristalamiento (6/8/6), realizado en orientación Sur, en un día despejado en periodo nocturno, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 20:00 del 9 y las 14:00 del 10 de Febrero de 2010. Su funcionamiento ha quedado descrito en el punto 5: funcionamiento del ensayo a pérdidas. La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

La gráfica, de igual interpretación que la anterior, nos muestra como la temperatura del vidrio con agua (verde) se mantiene en el rango de confort mientras que la temperatura del agua está por encima de la temperatura de consigna (22°C). La temperatura de la caja con agua (verde) desciende a la par que la temperatura del agua, manteniendo en las horas principales de la noche la temperatura a la par que la del agua, mientras que la caja con vidrio con cámara de aire (roja), desciende paulatinamente hasta encontrarse con la temperatura exterior. La diferencia de temperatura entre ambas cajas se mantiene casi en todo momento por encima de los 7°C.



Se consigue mantener la temperatura de confort en el interior de la caja hasta que el agua caliente cae radicalmente a las 23.45h. De todos modos se consigue mantener una diferencia de temperatura entre el agua y el vidrio en unos 5°C durante toda la noche.

La temperatura de la caja de vidrio con agua, se mantiene a la par que la temperatura del agua. De aquí se puede concluir que para mantener el confort en el interior durante la noche, basta subir o bajar la temperatura del agua al confort deseado en el interior.

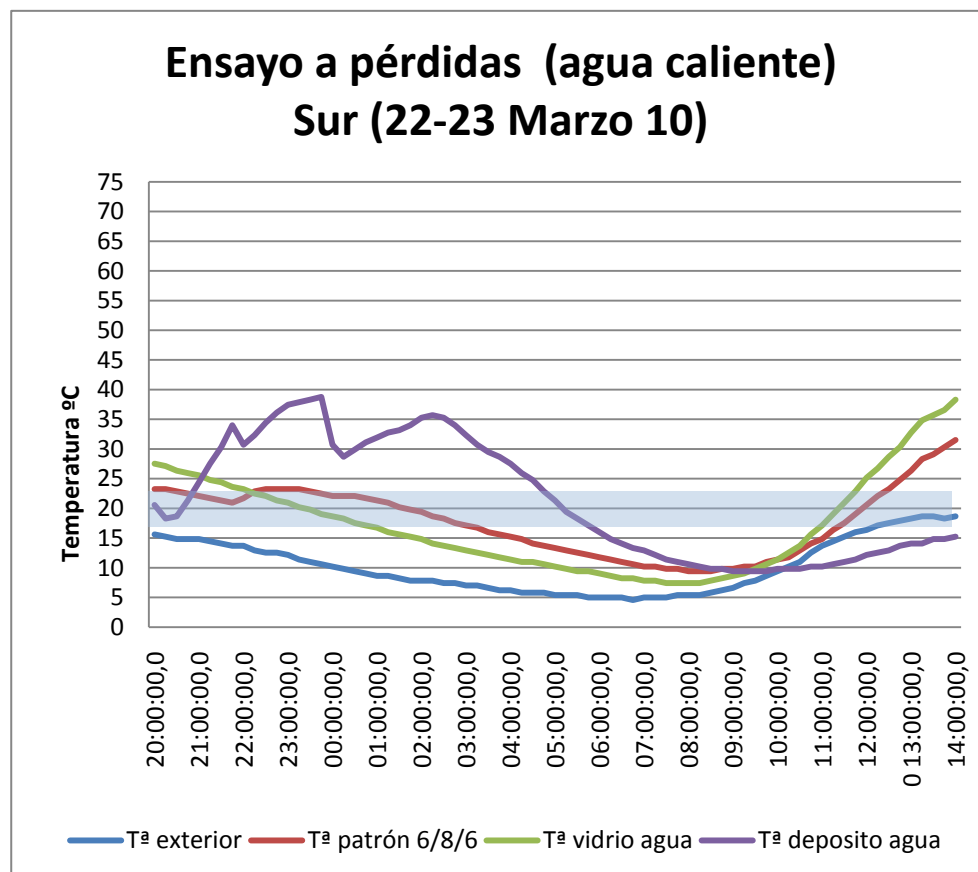
Se propone el uso de mejoras, entre ellas la generación de agua caliente mediante la utilización de un termo eléctrico capaz de mantener el agua caliente toda la noche.

**ENSAYO 47. ENSAYO CON VIDRIO CON CÁMARA DE AGUA Y GENERACIÓN DE AGUA CALIENTE. DOS CIRCUITOS: PRIMARIO Y SECUNDARIO.**

Se trata del ensayo de un vidrio con un acristalamiento con cámara de agua caliente generada y en dos circuitos, comparado con un doble acristalamiento (6/8/6), realizado en orientación Sur, en un día despejado en periodo nocturno, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 20:00 del 22 y las 14:00 del 23 de Marzo de 2010. Su funcionamiento ha quedado descrito en el punto 5: funcionamiento del ensayo a pérdidas. La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

La gráfica, de igual interpretación que la anterior, nos muestra como la temperatura de la caja con vidrio con agua (verde), mantiene 5°C de diferencia con el vidrio con aire (roja). No se observan muy buenos resultados debido a que el vidrio tenía pérdidas, y se ha roto debido al choque térmico.

En primer lugar la temperatura del depósito no es exactamente la real, puesto que se mezcló con agua a temperatura ambiente.



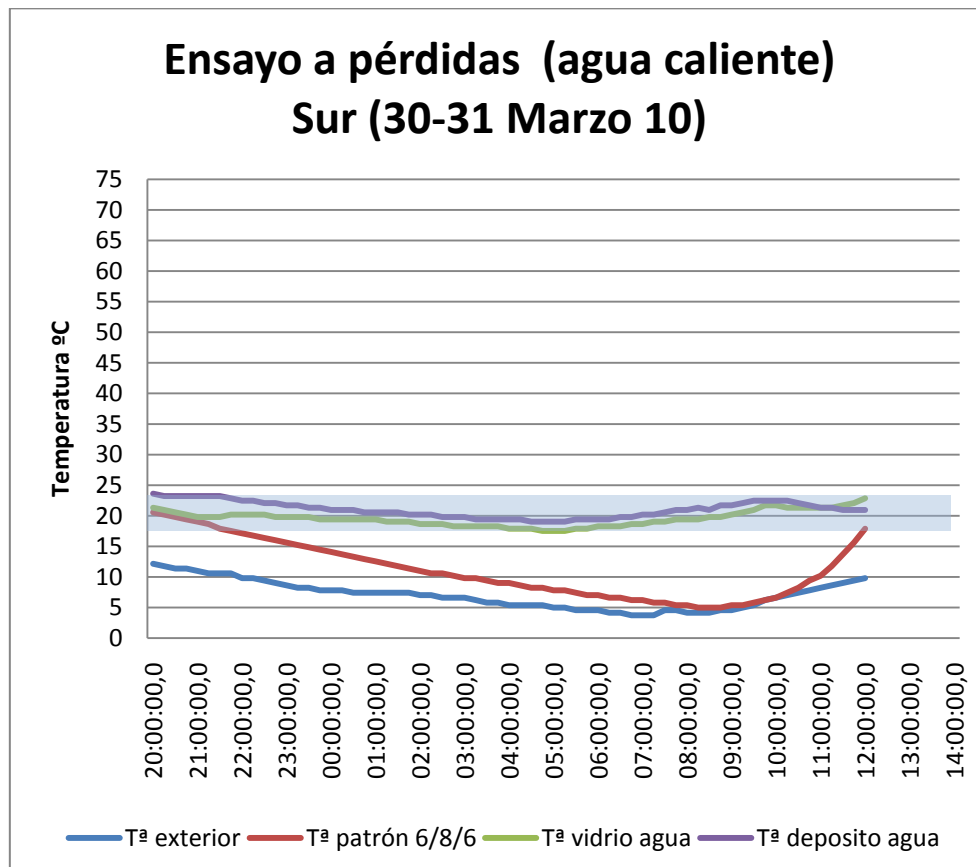
Consumo medido: 1.443 kWh.

**ENSAYO 48. ENSAYO CON VIDRIO CON CÁMARA DE AGUA Y GENERACIÓN DE AGUA CALIENTE CON UN SOLO CIRCUITO (PRIMARIO) Y NUEVAS MEJORAS.**

Se trata del ensayo de un vidrio con un acristalamiento con cámara de agua caliente generada en un solo circuito comparado con un doble acristalamiento (6/8/6), realizado en orientación Sur, en un día despejado en periodo nocturno, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 20:00 del 31 y las 12:00 del 31 de Marzo de 2010. Su funcionamiento ha quedado descrito en el punto 5: funcionamiento del ensayo a pérdidas. La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

La gráfica, de igual interpretación que la anterior, nos muestra cómo mientras el vidrio con cámara de aire (rojo) desciende paulatinamente conforme avanza la noche, el vidrio con cámara de agua (verde) se mantiene en la temperatura de confort, paralela a la temperatura del agua en la cámara, entre 22 y 24°C. Probablemente a la caldera se le tuvo que bajar mucho la potencia de manera que el termostato ha funcionado siempre en encendido. Esto unido a la falta de precisión a la hora de medir la temperatura del agua en el depósito intermedio, hace observar la temperatura del agua en una línea recta, y no en dientes de sierra.

De todos modos se puede dar por conseguido este ensayo puesto que el vidrio con cámara de agua se mantiene en la zona de confort durante toda la noche pero no se ha conseguido medir bien aún la temperatura del agua de la cámara.





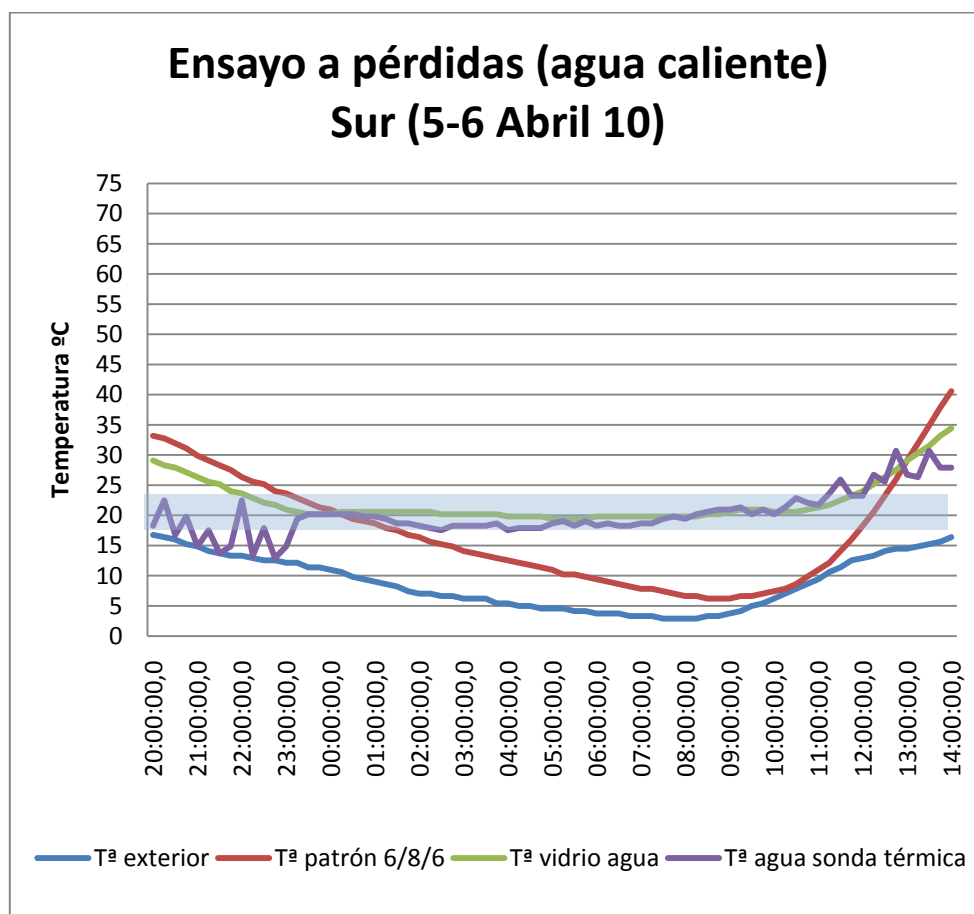
Se plantea la compra de una nueva bomba estanca para no depender del depósito y no sumergible, y la colocación de la sonda de agua en otro sitio, de modo que se pueda medir de un modo más fiable la temperatura del agua.

**ENSAYO 49. ENSAYO DE VIDRIO CON CÁMARA DE AGUA Y GENERACIÓN DE AGUA CALIENTE CON UN SOLO CIRCUITO ELIMINADO EL DEPÓSITO INTERMEDIO.**

Se trata del ensayo de un vidrio con un acristalamiento con cámara de agua caliente generada, en un solo circuito, del que se ha eliminado el depósito (termotanque) intermedio, comparado con un doble acristalamiento (6/8/6), realizado en orientación Sur, en un día despejado en periodo nocturno, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 20:00 del 4 y las 14:00 del 5 de Abril de 2010. Su funcionamiento ha quedado descrito en el punto 5: funcionamiento del ensayo a pérdidas. La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

La sonda de temperatura fue intercalada en un racor de cobre interpuesto en el circuito.

La gráfica, de igual interpretación que la anterior, nos muestra cómo igual que en la anterior, el vidrio con cámara de agua se logra mantener en la zona de confort (banda azul), mientras que el vidrio con cámara de aire desciende paulatinamente. La temperatura del agua (morada) se muestra un poco más precisa que los anteriores, por los dientes de sierra que aparecen, lo que indica el encendido-apagado de la bomba durante el periodo inicial y final.



En este caso la temperatura del agua se midió mediante la sustitución de una parte del conducto de agua por un pequeño racor de cobre. La sonda se pegó al cobre. En las primeras horas se observa un mejor funcionamiento, pero a partir de las 23:00h sobretodo se observa una mayor influencia de la temperatura exterior, observándose en la desaparición de los dientes de sierra y en una disminución de la temperatura del agua, establecida en el termostato en unos 37°C.

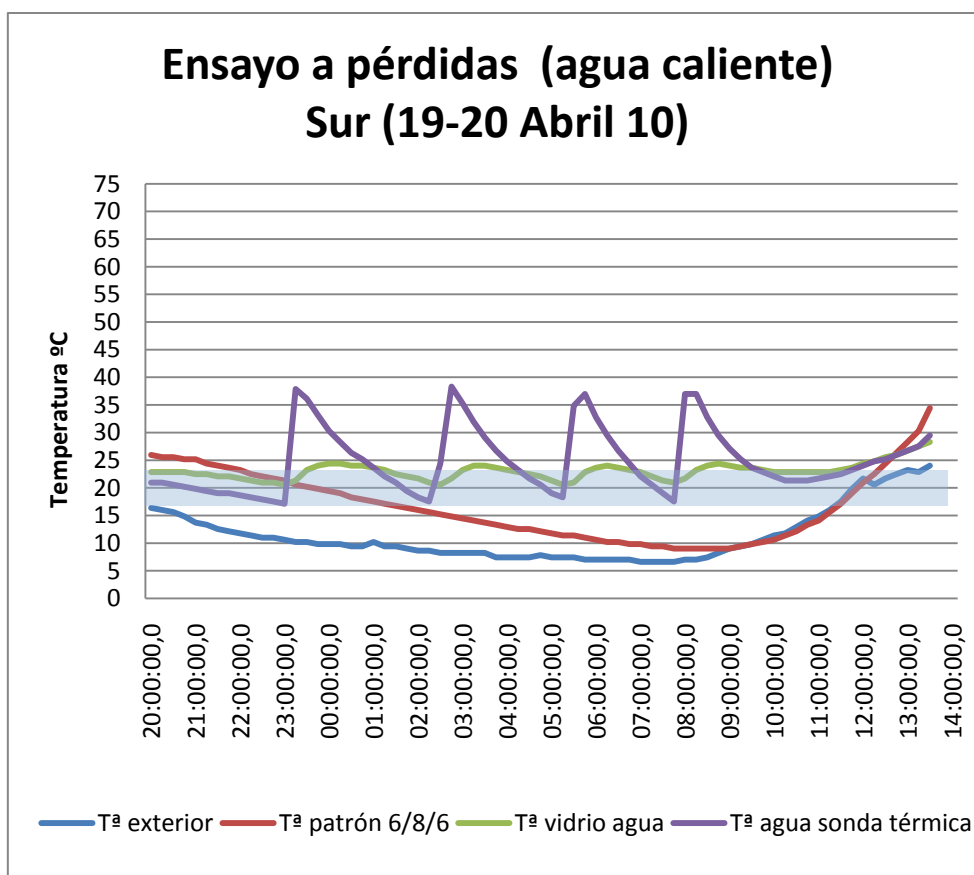
Se plantea repetir el ensayo intentando medir bien la temperatura del agua.

Consumo medido: 2,34 kWh.

**ENSAYO 50. ENSAYO DE VIDRIO CON CÁMARA DE AGUA Y GENERACIÓN DE AGUA CALIENTE CON UN SOLO CIRCUITO ELIMINADO EL DEPÓSITO INTERMEDIO.**

Se trata del ensayo de un vidrio con un acristalamiento con cámara de agua caliente generada, en un solo circuito, análogo al anterior, pero con la diferencia de que la sonda térmica se ha introducido al vidrio por uno de los taladros previamente realizados. El ensayo es comparado con un doble acristalamiento (6/8/6), realizado en orientación Sur, en un día despejado en periodo nocturno, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 20:00 del 19y las 12:00 del 20 de Abril de 2010. Su funcionamiento ha quedado descrito en el punto 5: funcionamiento del ensayo a pérdidas. La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

La gráfica, de igual interpretación que la anterior, nos muestra cómo igual que en la anterior, el vidrio con cámara de agua se logra mantener en la zona de confort (banda azul) a diferencia del vidrio con cámara de aire (línea roja) que desciende gradualmente hasta encontrarse con la temperatura exterior (línea azul).



La temperatura de agua (línea morada) se observa en dientes de sierra, lo que indica el encendido-apagado de la bomba en función del termostato colocado en el interior de la caja con consigna a 20°C. Su amplitud es debida a que la temperatura del agua en el termo eléctrico se estableció en 37°C.

Se observa además los pequeños aumentos de temperatura (entre 21°C y 24°C) en la caja del vidrio con agua coincidentes con los picos de temperatura del agua de la cámara.

No se dispone de lectura de datos de consumo del contador de energía debido a una desconexión eléctrica.

Se plantea la repetición del ensayo, de modo de obtener lecturas de consumo del contador de energía, y en bajar la temperatura del termo eléctrico.

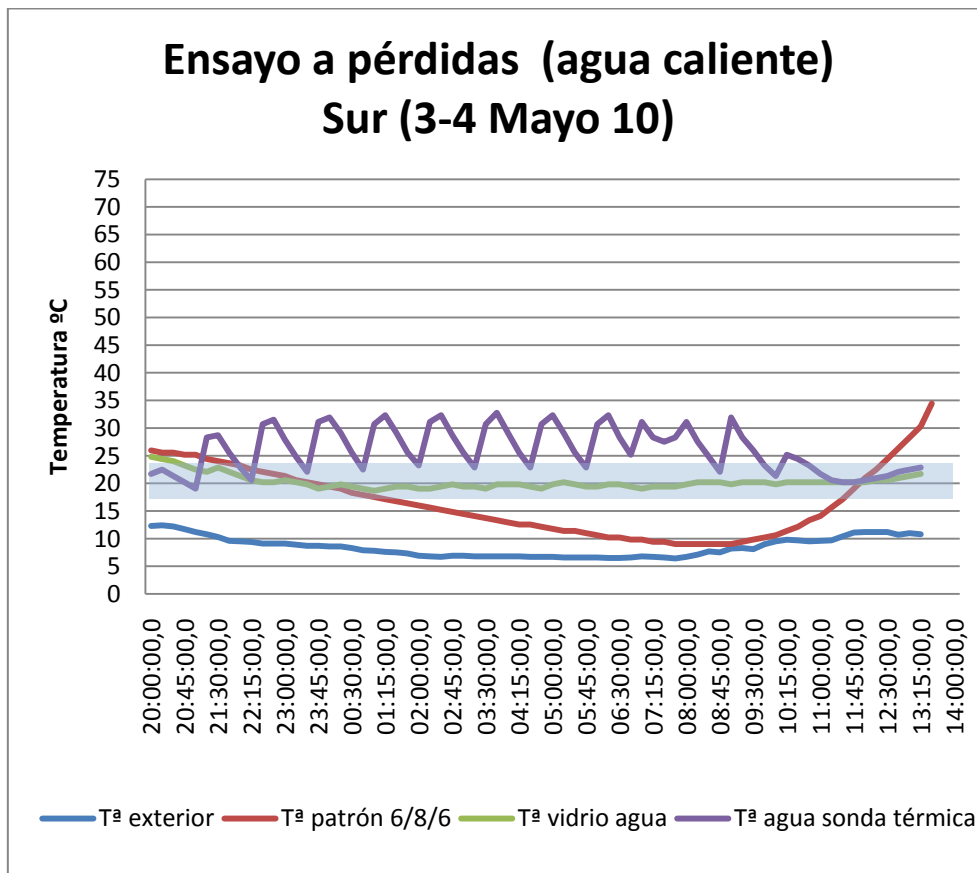
**ENSAYO 51. ENSAYO DE VIDRIO CON CÁMARA DE AGUA Y GENERACIÓN DE AGUA CALIENTE CON UN SOLO CIRCUITO ELIMINADO EL DEPÓSITO INTERMEDIO.**

Se trata del ensayo de un vidrio con un acristalamiento con cámara de agua caliente generada, en un solo circuito, análogo al anterior, comparado con un doble acristalamiento (6/8/6), realizado en orientación Sur, en un día despejado en periodo nocturno, tomando mediciones cada 15 minutos durante una noche, representando en la gráfica los datos más característicos entre las 20:00 del 3y las 14:00 del 4 de Mayo de 2010. Su funcionamiento ha quedado descrito en el punto 5: funcionamiento del ensayo a pérdidas. La curva azul muestra la evolución de la temperatura exterior, tomada de los datos cedidos por AEMET.

La gráfica, de igual interpretación que la anterior, nos muestra cómo el vidrio con cámara de agua (línea verde) igual que en los anteriores ensayos se mantiene en el rango de temperatura de confort durante toda la noche (franja de color azul). La temperatura del agua (línea morada) se observa en dientes de sierra, que indica la conexión-desconexión de la bomba de agua. En este caso se observa, al disminuir la temperatura del termo eléctrico en 33°C, como la amplitud de los dientes de sierra disminuye.

Se observa una diferencia máxima de temperaturas entre ambos vidrios que alcanza los 10°C a las 8:00h.

Consumo medido: 2.111 kWh.



### 7.7. CONCLUSIONES PARCIALES:

Como conclusión fundamental de este capítulo se puede decir que se ha desarrollado y generado un nuevo método de ensayo, sencillo, económico, transportable, capaz de medir las prestaciones y el comportamiento térmico de distintos tipos de vidrio bajo condiciones reales, en las diversas orientaciones, en comparación con un vidrio patrón, de un modo fiable y preciso.

Con el fin de clarificar este punto se ha decidido dividir las conclusiones en ensayos a captación de vidrios convencionales, ensayos a pérdidas de vidrios convencionales y vidrios con cámara de agua.

#### 7.7.1. ENSAYOS A CAPTACIÓN.

- Se ha observado un muy buen comportamiento de los ensayos a control solar, tal y como hemos podido observar en los ensayos expuestos anteriormente, destacando levemente el vidrio SS-20, que se caracteriza por su buen comportamiento en las dos orientaciones Este y Oeste, disminuyendo la temperatura del interior de la caja de ensayo en un 29% en orientación Este y en un 25% en orientación Oeste, mientras que el TS-30 disminuye la temperatura en un 25% y en un 20% respectivamente. Esto coincide con las características de los vidrios dadas por la empresa, en la que el vidrio SS-20 es un 24% mejor observando el factor solar.
- Se ha comprobado una muy baja efectividad del vidrio de cristal líquido ensayado, incluso en estado apagado (translúcido), reduciendo la temperatura en un 20%.

#### 7.7.2. ENSAYOS A PÉRDIDAS

- Sorprendentemente, y a pesar de las características (Transmitancia térmica U) de los tres vidrios bajo emisivos, que oscila entre un 1.7 y un 1.76 W/m<sup>2</sup>°K frente a 3 W/m<sup>2</sup>°K de un doble acristalamiento 6/8/6, se observa una muy escasa diferencia entre los dos tipos de vidrios a pérdidas, no siendo así en captación donde se han comprobado experimentalmente reducciones sensibles derivadas del factor solar reducido inherente a los vidrios bajo emisivos.

#### 7.7.3. VIDRIOS CON CÁMARA DE AGUA

- Se ha llegado a definir la experimentación de la eficiencia energética de vidrios dinámicos mediante el funcionamiento de un vidrio con cámara agua, tal y como se ha descrito en el punto 7.5, con el fin de comprobar empíricamente los datos teóricos expuestos por Tin Tai Chow (2009) y las aportaciones de la empresa Intelliglass. La empresa afirma que su vidrio funciona como un intercambiador de calor, de manera que absorbe o cede calor al interior.
- Se ha llegado a diseñar, estudiar y describir el vidrio con cámara de agua: diseño inicial del prototipo, definiendo los tubos de alimentación al vidrio; mejoras realizadas, en el sellado del vidrio, renovación de las conexiones al

vidrio para un mejor reparto en la entrada del agua, y una salida proporcional a la impulsión, y aquellas mejoras referentes al vidrio sustituyendo el vidrio 6/8/6 por un vidrio laminado en ambas caras 4+4/6/4+4, con el fin de evitar el escape de agua en caso de rotura, y poder continuar con el ensayo. Del mismo modo señalar las modificaciones incorporadas a los ensayos, para mejorar su comportamiento tanto en captación como en pérdidas, destacando la mejora del radiador con ventilador y la incorporación del termo eléctrico para el estudio del fenómeno durante el solsticio de verano e invierno, respectivamente.

- Excelente comportamiento del vidrio con cámara de agua a captación, mejorando especialmente con refrigeración exterior, donde se ha observado una disminución de la temperatura interior de la caja de ensayo con vidrio con cámara de agua hasta en un 40% y conservando en todo momento la transparencia, factor que se ve perjudicado en los vidrios de control solar.
- Según se ha comprobado experimentalmente, existe la posibilidad de apoyar la instalación de calefacción con calentamiento de agua a baja temperatura, calentada ésta por radiación solar como se ha podido comprobar con el ensayo nº 46.
- Se ha demostrado experimentalmente que el vidrio con cámara de agua en su funcionamiento a pérdidas puede mantener una temperatura de confort (establecida entre 18 y 22°C) durante toda una noche, mediante agua preparada a baja temperatura (32°C), con un bajo consumo.



## ÍNDICE CAPÍTULO 8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

<b>8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>295</b>
8.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DE SIMULACIÓN.	295
8.1.1. Captación solar.....	297
8.1.1.1. Ensayos a oeste .....	298
8.1.1.2. Ensayos a este.....	305
8.1.1.3. Conclusiones parciales sobre captación.....	311
8.1.2. Ensayos a pérdidas. ....	313
8.1.2.1. Conclusiones parciales sobre pérdidas. ....	331
8.1.3. Consideraciones sobre la comparación entre resultados experimentales y de simulación. ....	332
8.2. ESTIMACIÓN DE LAS MEJORAS ENERGÉTICAS APORTADAS POR EL VIDRIO CON AGUA CIRCULANTE EN LA CÁMARA. ....	332
8.3. CONCLUSIONES PARCIALES .....	339



## 8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 8.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DE SIMULACIÓN.

Tras realizar un estudio del comportamiento de diferentes tipos de vidrio mediante simulación y ensayos se va a proceder a comparar los resultados de uno y otro ciclo para poder observar la precisión en los resultados de las simulaciones y alcanzar una mejor comprensión general del fenómeno.

Para realizar estas comparaciones se ha optado por representar la curva de temperaturas procedente de los ensayos y de las simulaciones, para posteriormente superponerlas en el mismo gráfico con distintos códigos de línea, pero manteniendo el mismo color en todo momento para el vidrio ensayado, vidrio patrón y temperatura exterior. Esta decisión se ha tomado ya que los intercambios energéticos dependen directa y linealmente de los cambios de temperatura.

Se puede decir en la simulación que se realizaron pruebas poco y muy aisladas, descartándose las poco aisladas para la captación, tal y como se ha explicado en el punto 6.

Mediante el método de cálculo expuesto en el Anexo 4: procedimiento de cálculo simplificado se calculará el parámetro afectado por la captación y por el ensayo, esto es, el factor solar (g) y la transmitancia térmica (U), a partir de los valores de los parámetros del vidrio patrón (doble acristalamiento 6/8/6). Se ha de dejar constancia que no se busca en ningún momento poner en duda los valores de los parámetros dados por la empresa, sino calcular el factor solar y la transmitancia térmica efectiva en cada momento y cada orientación, que como se ha visto anteriormente el U y el g, son valores medios obtenidos, variando a lo largo de un día en función de la inclinación del sol.

Para el ensayo a captación, se comparará el Factor solar del vidrio patrón con el Factor Solar del vidrio en cuestión dado por la empresa y el nuestro, en este caso control solar, obteniendo tras realizar diversos cálculos la siguiente fórmula:

$$F_s = 1 - \frac{E_{R2}}{E_1}$$

Nótese, que las simulaciones realizadas para captación, se han hecho con las cajas aisladas, para que los resultados tuvieran cierta coherencia con lo que se había obtenido en los ensayos físicos.

Para el ensayo a pérdidas, compararemos el valor U del vidrio patrón con el U del vidrio en cuestión dado por la empresa y el nuestro, en este caso bajo-emisivo, obteniendo tras realizar diversos cálculos la siguiente fórmula:

$$U_2 = 3,66 \frac{S_1}{S_2} - 0,88$$

Donde:

U<sub>2</sub>: valor de la transmitancia térmica en un día determinado.

S1 y S2, la superficie del área de la curva.

El cálculo de estos valores, nos ayudará una vez sustituidos de nuevo en el programa de simulación, al ajuste de los programas en caso de observar diferencias, y por tanto verificar su fiabilidad.

Finalmente se intenta ajustar un poco más la simulación modificando el Factor solar g efectivo o la transmitancia térmica U efectiva del vidrio ensayado para conseguir la máxima similitud en las gráficas.

Dado que resulta a priori imposible simular el comportamiento del vidrio con agua circulante en la cámara se utilizará el vidrio patrón como base para hacer comparaciones. Así en una fase siguiente se van a proponer unas curvas tipo de comportamiento de los diferentes tipos de vidrio estudiados, en unas condiciones ideales de día promedio de verano cercano al solsticio. Unos gráficos resumen permitirán la comparación de todos los vidrios en cada día tipo.

A continuación se elaborará un nuevo conjunto de gráficos restando de las curvas de cada vidrio la temperatura exterior y el vidrio patrón, visualizándose en cada caso su comportamiento diferencial sobre el vidrio patrón.

De todo ello se extraerán unas conclusiones definitivas sobre el comportamiento de cada tipo de vidrio con respecto al vidrio patrón, incluyendo una cuantificación de sus prestaciones energéticas.

**8.1.1. CAPTACIÓN SOLAR**

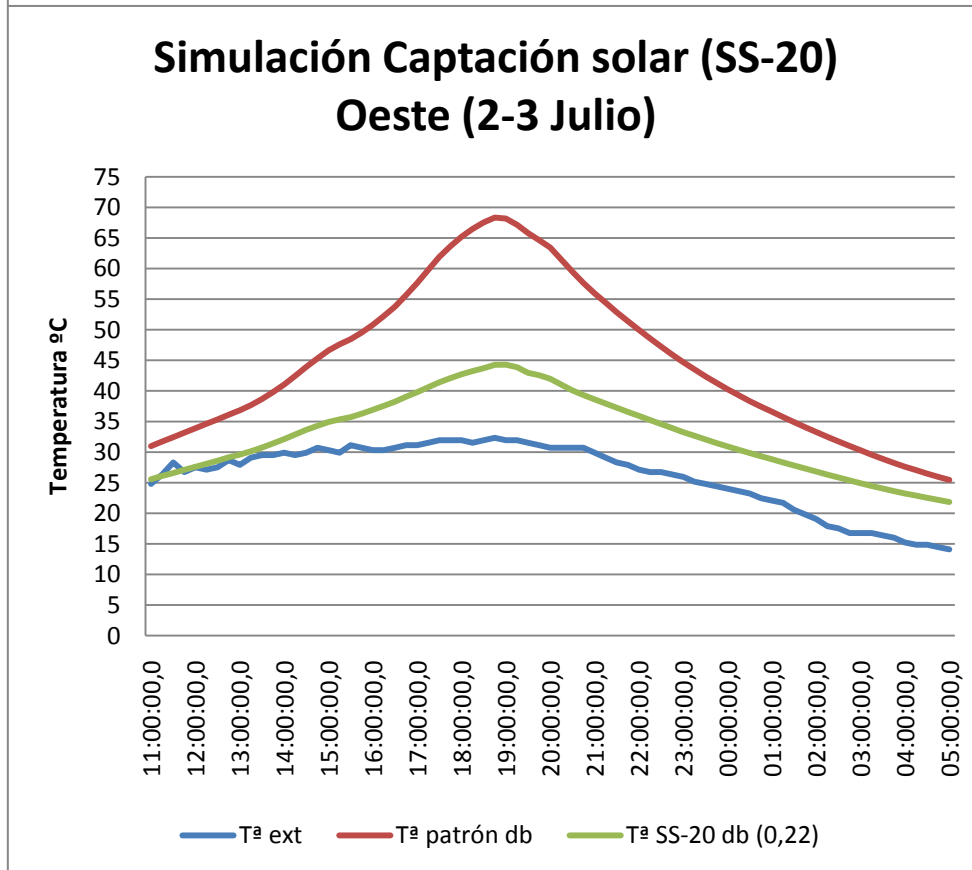
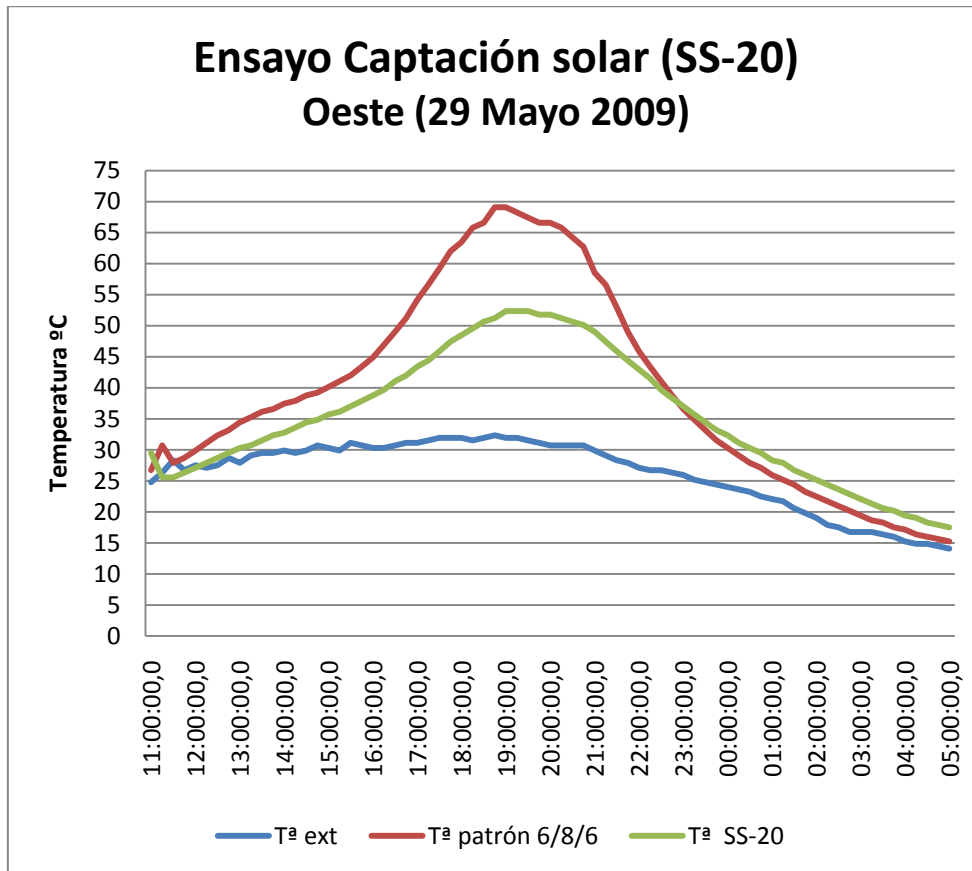
Se exponen las características de los vidrios de control solar ensayados, tanto en proceso empírico como mediante simulación.

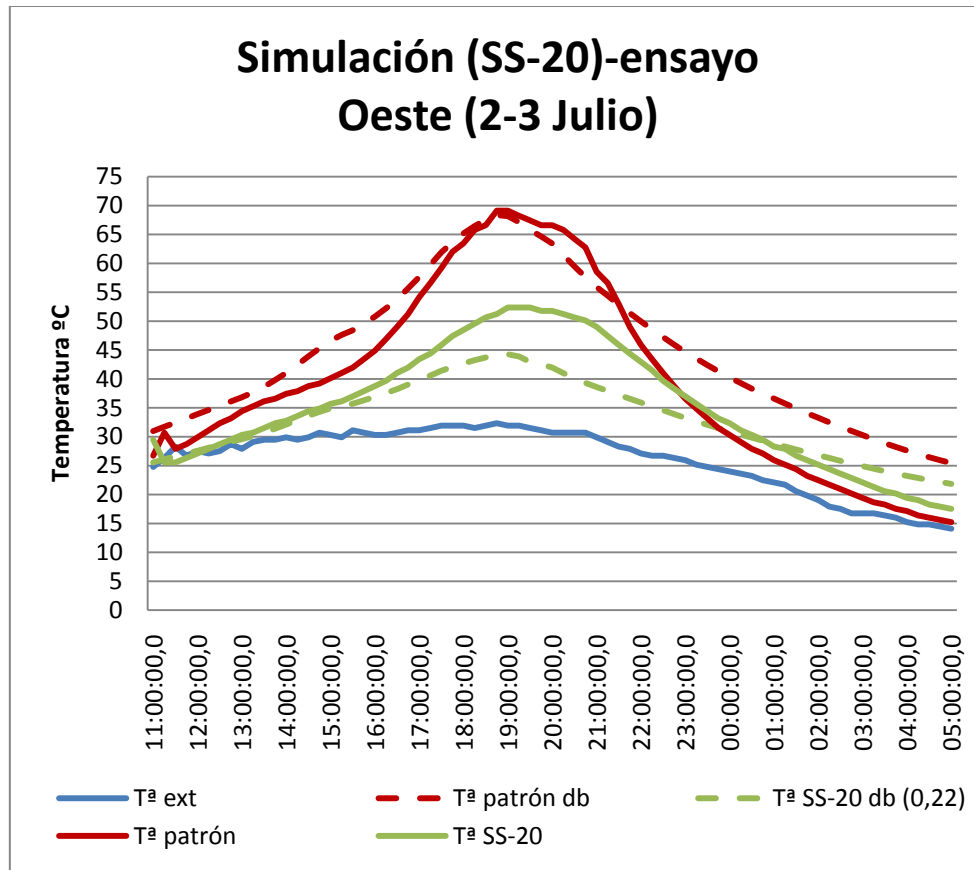
Tabla 8-I. Tabla de características vidrios de control solar.

<b>TABLA DE COMPARACIÓN DE VIDRIOS</b>					
<b>Nombre de vidrio</b>	<b>Procedencia de los Datos</b>	<b>Composición</b>	<b>U W/m<sup>2</sup>K</b>	<b>Tv (tanto por uno)</b>	<b>g (factor solar) (tanto por uno)</b>
<b>SS-20. Control solar</b>	Empresa	6/12/6, compuesto por vidrio incoloro y capa metálica control solar SS-20, y cámara de aire 100% puro.	2.6	0.18	0.22
<b>TS-30. Control solar</b>	Empresa	6/12/6, compuesto por vidrio incoloro y capa metálica control solar TS-30, y cámara de aire 100% puro.	2.7	0.28	0.29
<b>Doble vidrio</b>	Empresa	6/8/6, compuesto por doble vidrio incoloro y cámara de aire 100% puro.	3.03	0.79	0.72

**8.1.1.1. ENSAYOS A OESTE**

**VIDRIO SS-20**





Al observar y comparar las dos gráficas anteriores superpuestas en una tercera, se observa que mientras que existe una igualdad relativa en el vidrio patrón (doble acristalamiento 6/8/6) entre el ensayo físico (línea continua roja) y la simulación (línea discontinua roja), hay una gran diferencia en el vidrio de control solar de 7°C de diferencia a las 19h (líneas verde continua y discontinua).

Con el objetivo de llegar a validación de los resultados del programa de simulación, se va a proceder a calcular el Factor solar efectivo en ese momento del vidrio de control solar y aplicarlo a la simulación.

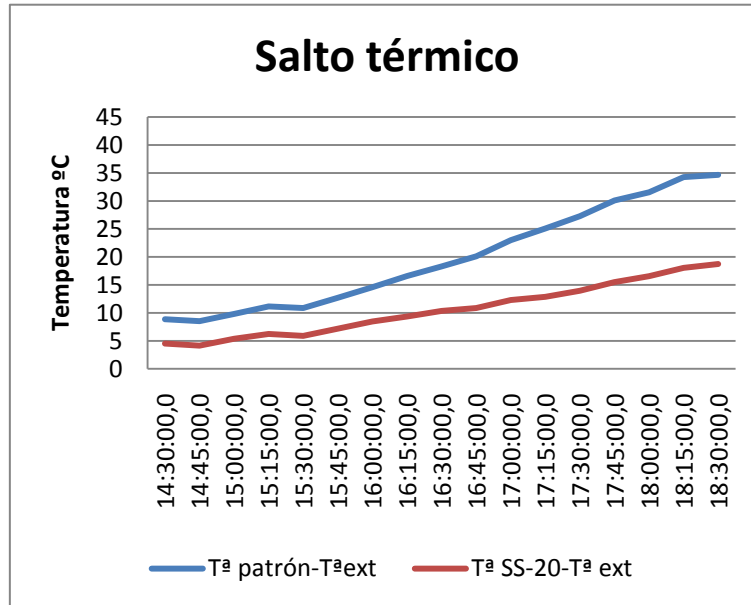
Para ello se parte de los siguientes datos de partida: (Datos Anexo 3. Punto 5).

- $Fs1=0,72$
- $Fs2=0,22$
- $U1=3.031$
- $U2=2.6$

Durante un intervalo de tiempo idéntico  $\Delta t$ , la energía recibida  $E_i$  por ambas cajas es la misma.

$$E_{i1}=E_{i2}.$$

Tomando de la gráfica de ensayo un mismo salto térmico, expuesto en la siguiente gráfica, se pueden calcular los valores S1 Y S2 correspondientes a la superficie del salto térmico del doble acristalamiento y del control solar respectivamente.



Sabiendo que la energía incidente es la suma de la energía reflejada, absorbida y transmitida, según la siguiente ecuación:

$$E_i = E_R + E_A + E_T$$

Se obtiene que el Factor Solar del vidrio de ensayo es:

$$F_s = 1 - \frac{E_{R2}}{E_i}$$

Donde ER es la energía reflejada y Ei es la energía incidente.

La energía reflejada en el vidrio de control solar se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$E_{R2} = (1.38\Delta T_1 - \Delta T_2)I + 1.94S_1 - (0.36U_2 + 0.32)S_2$$

$$E_{R2} = (1.38 * 25.8 - 14.2) * 2 + 1.94 * 84.36 - (0.36 * 2.6 + 0.32) * 45.085 = 149.83Wh.$$

Por otra parte la energía incidente es:

$$E_{A2} = \Delta T_2 \times I = 14.2 * 2 = 28.4Wh$$

$$E_{T2} = 0.36U_2S_2 + 0.32S_2 = (0.36U_2 + 0.32)S_2 = (0.36 * 2.6 + 0.32) * 45.085 = 56.6Wh.$$

$$E_i = E_{R2} + E_{A2} + E_{T2} = 149.83 + 28.4 + 56.6 = 234.83Wh.$$

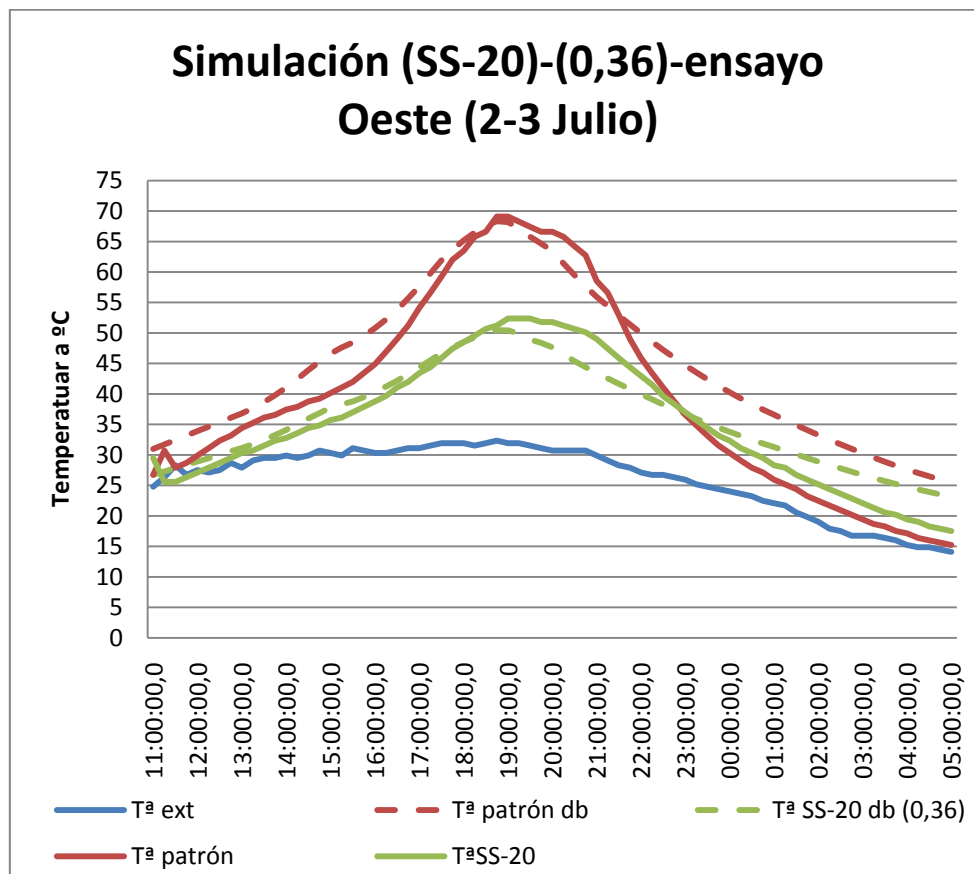


El factor solar del vidrio a estudiar sería:

$$F_s = 1 - \frac{E_{R2}}{E_I} = 1 - \frac{149.83}{234.83} = 0.36$$

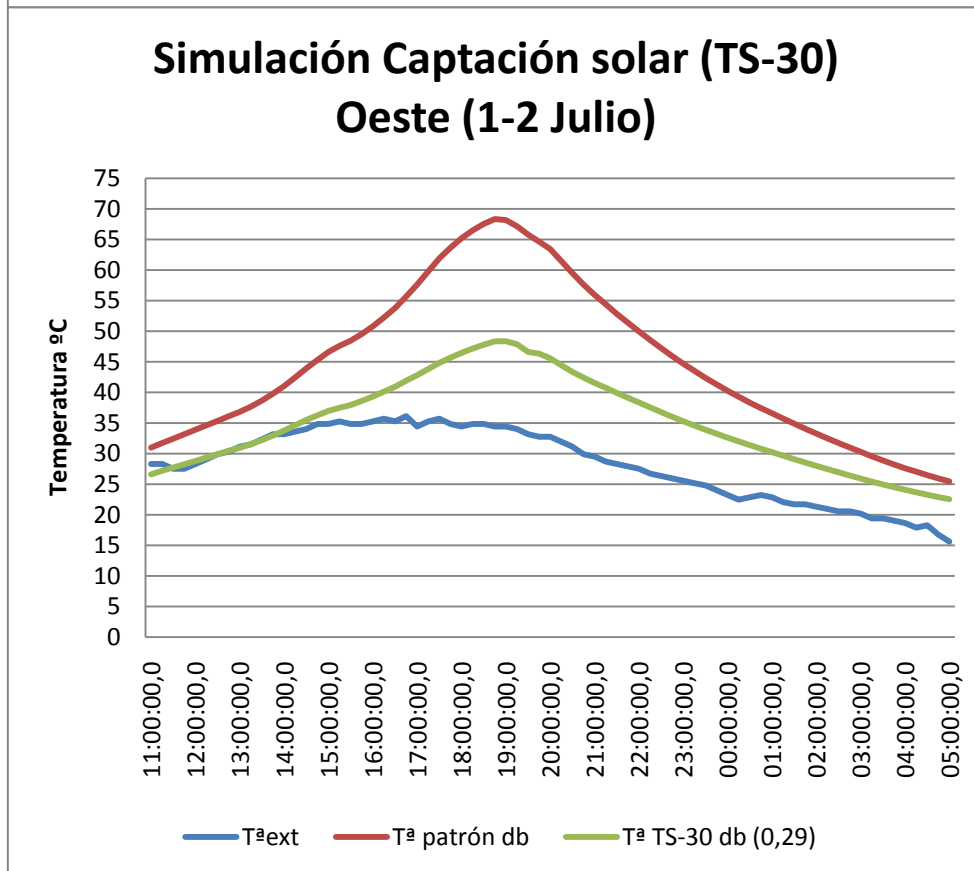
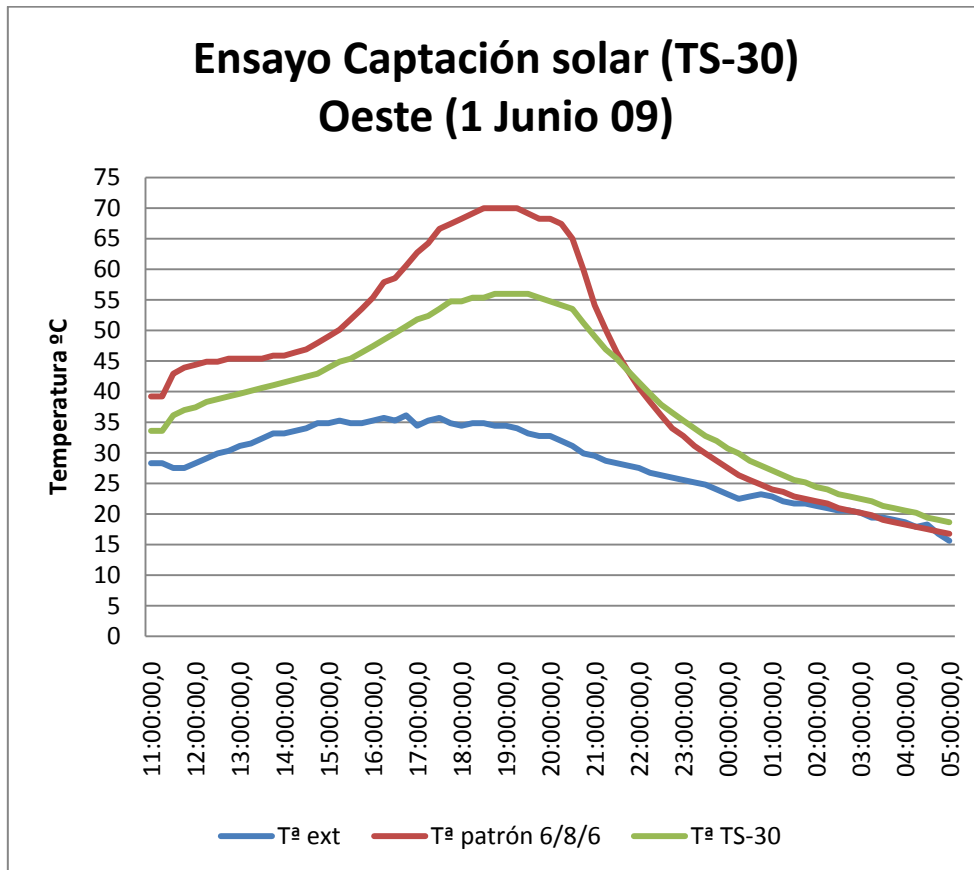
El factor solar corregido resulta ser (0.36), que es un 63.6% superior al dado por el fabricante (0.22).

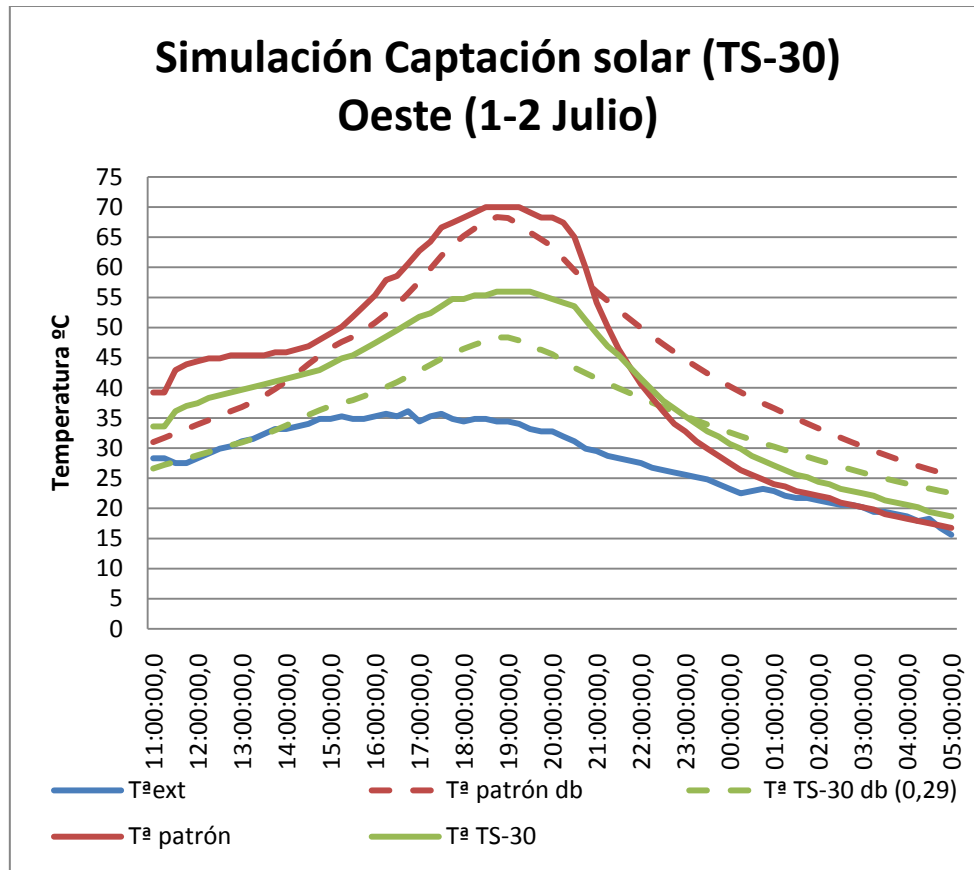
Puesto que el factor solar del vidrio ensayado queda muy por encima al que supuestamente tenía dado por el fabricante se ha modificado la simulación aplicando el factor solar efectivo del vidrio SS-20 obtenido ( $F_s=0.36$ ), resultando la siguiente gráfica.



Al cambiar el factor solar del vidrio SS-20 al calculado anteriormente, se obtiene dos captaciones similares en las curvas del vidrio de control solar (líneas verdes continua y discontinua).

**VIDRIO TS-30.**





Al observar y comparar las dos gráficas anteriores superpuestas en una tercera, se observa que mientras que existe una igualdad relativa en el vidrio patrón (doble acristalamiento 6/8/6) entre el ensayo físico (línea continua roja) y la simulación (línea discontinua roja), hay una gran diferencia en el vidrio de control solar de 6°C de diferencia a las 19h (líneas verde continua y discontinua).

Con el objetivo de llegar a una validación de los resultados del programa de simulación, se va a proceder a calcular el Factor solar efectivo en ese momento del vidrio de control solar y aplicarlo a la simulación.

Para ello se parte de los siguientes datos de partida:

- $Fs1=0,72$
- $Fs2=0,29$
- $U1=3.031$
- $U2=2.7$

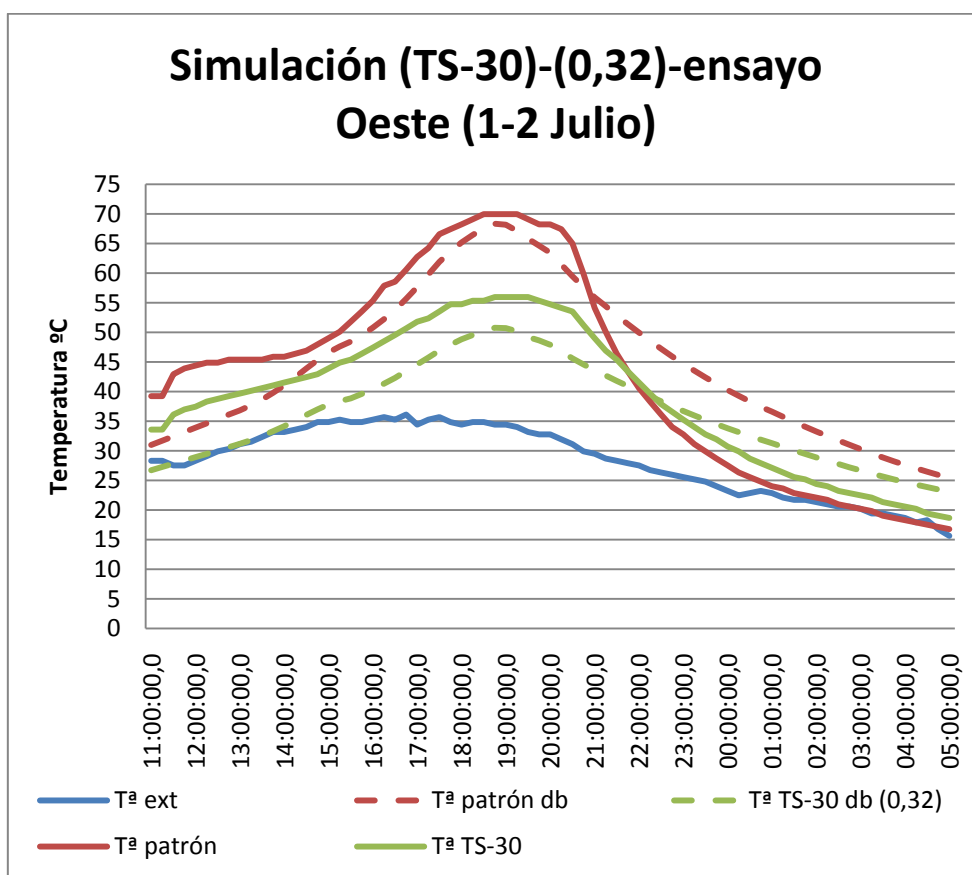
Análogamente como se ha procedido en el caso anterior calculamos el factor solar efectivo del vidrio.

El factor solar del vidrio a estudiar sería:

$$F_s = 1 - \frac{E_{R2}}{E_I} = 1 - \frac{231.06}{343.4} = 0.32$$

El factor solar obtenido (0.32) es un 10.3% superior al dado por el fabricante (0.29).

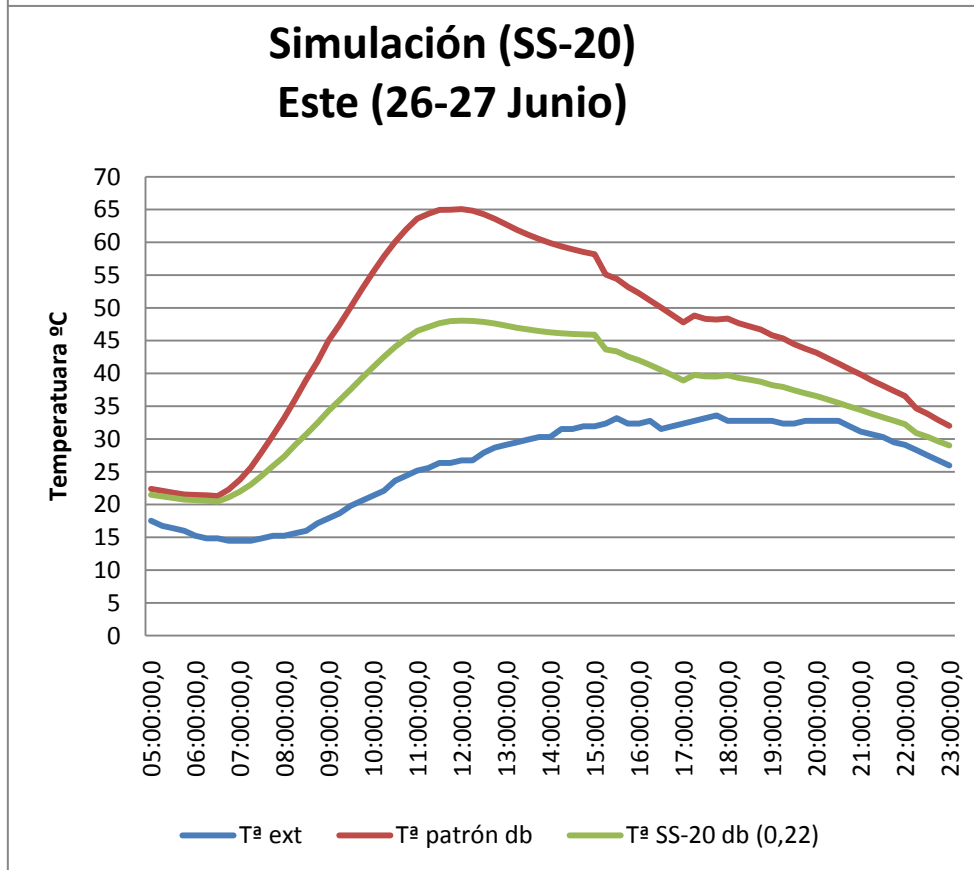
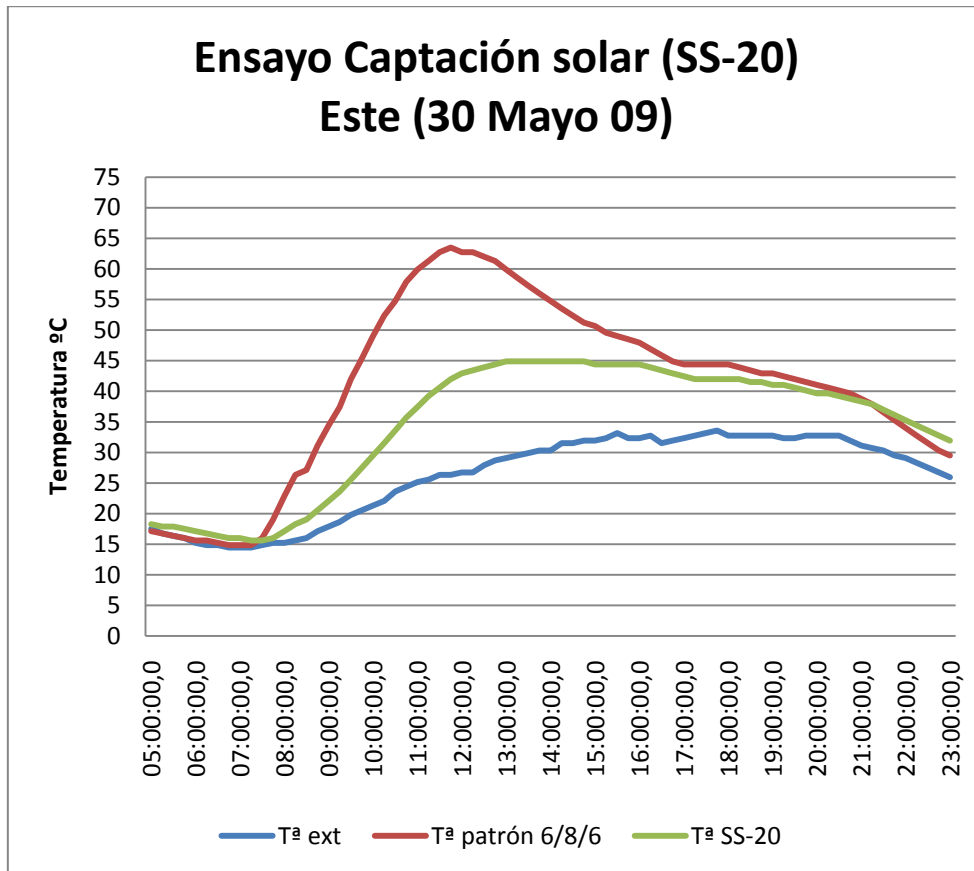
Puesto que el factor solar del vidrio ensayado queda muy por encima al que supuestamente tenía dado por el fabricante se ha modificado la simulación aplicando el factor solar efectivo del vidrio TS-30 obtenido (Fs=0.32), resultando la siguiente gráfica.

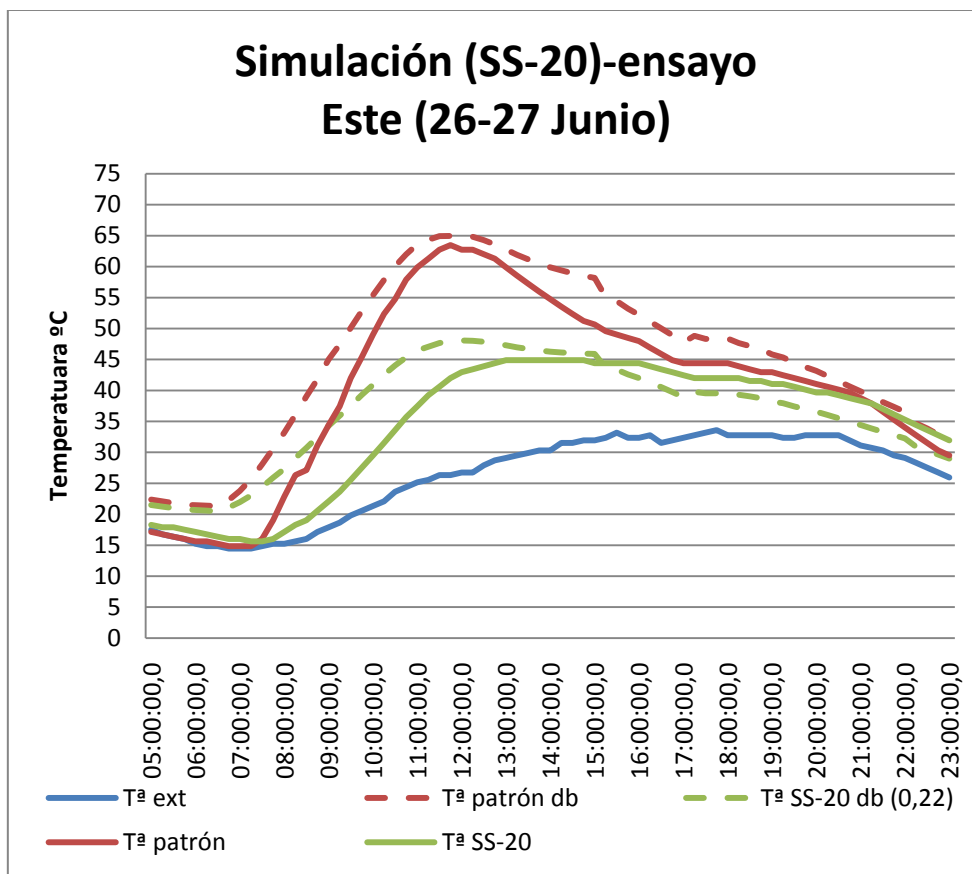


Al cambiar el factor solar del vidrio SS-20 al calculado anteriormente (0,32), se demuestra que el factor solar aún es insuficiente, siendo ya únicamente la diferencia de temperatura de 4,5°C.

8.1.1.2. ENSAYOS A ESTE

VIDRIO SS-20





Al observar y comparar las dos gráficas anteriores superpuestas en una tercera, se observa que mientras que existe una igualdad relativa en el vidrio patrón (doble acristalamiento 6/8/6) entre el ensayo físico (línea continua roja) y la simulación (línea discontinua roja), hay una gran diferencia en el vidrio de control solar de 6°C de diferencia a las 19h (líneas verde continua y discontinua).

Con el objetivo de llegar a una validación de los resultados del programa de simulación, se va a proceder a calcular el Factor solar efectivo en ese momento del vidrio de control solar y aplicarlo a la simulación.

Para ello se parte de los siguientes datos de partida:

- $Fs1=0,72$
- $Fs2=0,22$
- $U1=3.031$
- $U2=2.6$

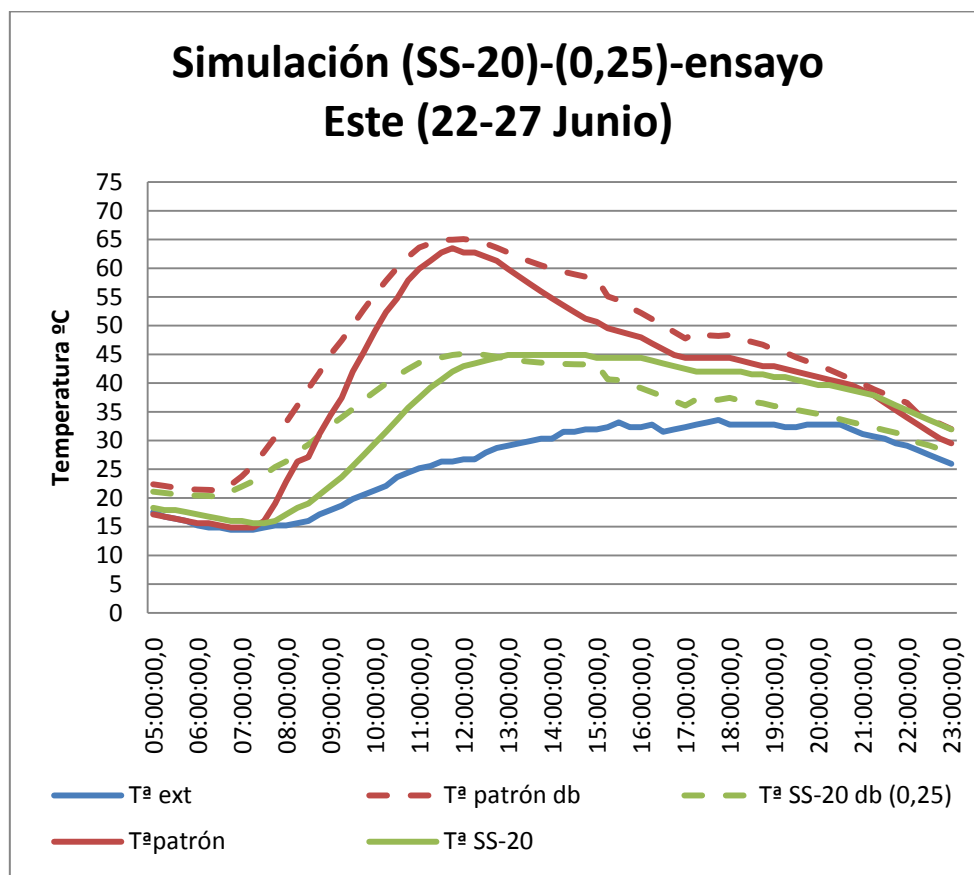
Análogamente como se ha procedido en el caso anterior calculamos el factor solar efectivo del vidrio.

El factor solar del vidrio a estudiar sería:

$$F_s = 1 - \frac{E_{R2}}{E_I} = 1 - \frac{212.3}{286.05} = 0.25$$

El factor solar obtenido (0.25) es un 13% superior al dado por el fabricante (0.22).

Puesto que el factor solar del vidrio ensayado queda por encima al que supuestamente tenía dado por el fabricante se ha modificado la simulación aplicando el factor solar efectivo del vidrio SS-20 obtenido ( $g=0.25$ ), resultando la siguiente gráfica.



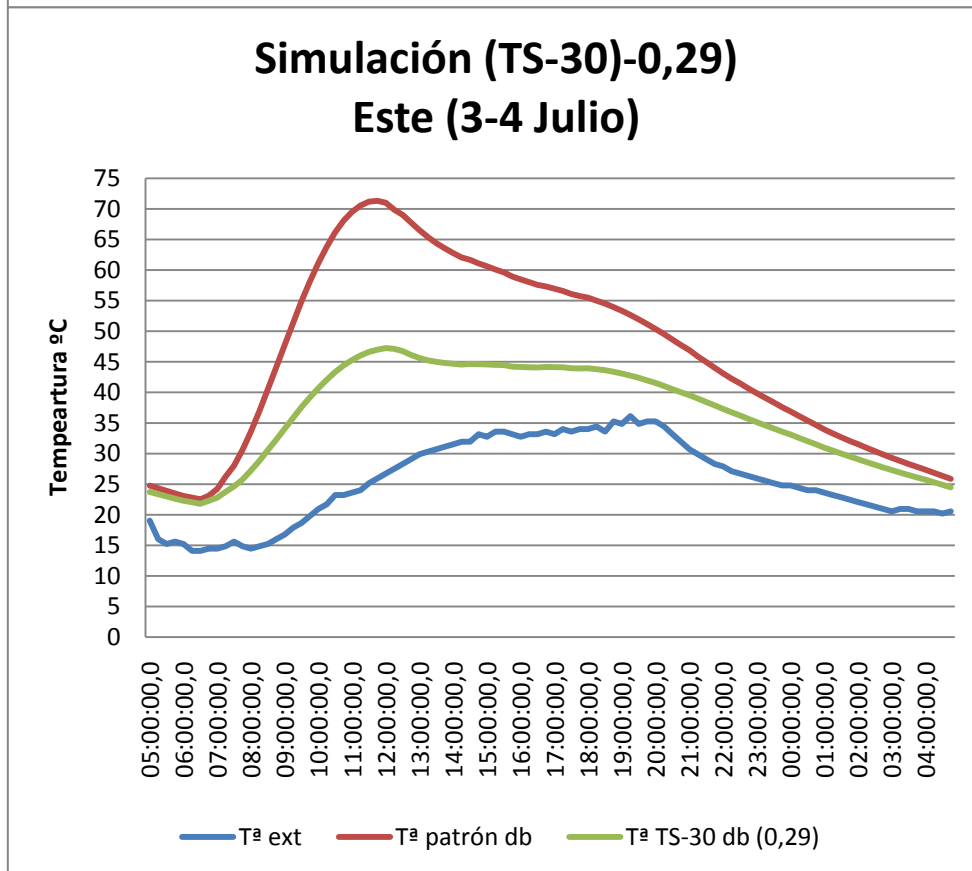
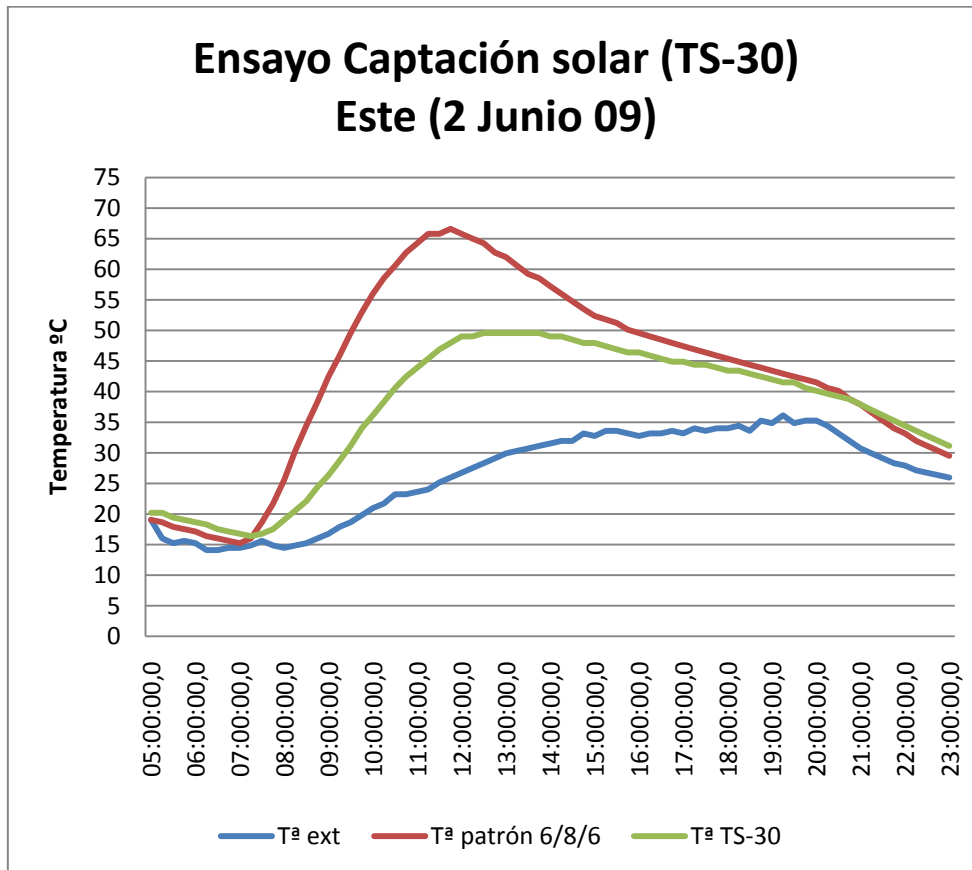
La diferencia de temperatura entre ambos vidrios SS-20 (Simulación y ensayo) se iguala bastante, salvo pequeñas diferencias de los días en la radiación solar incidente.

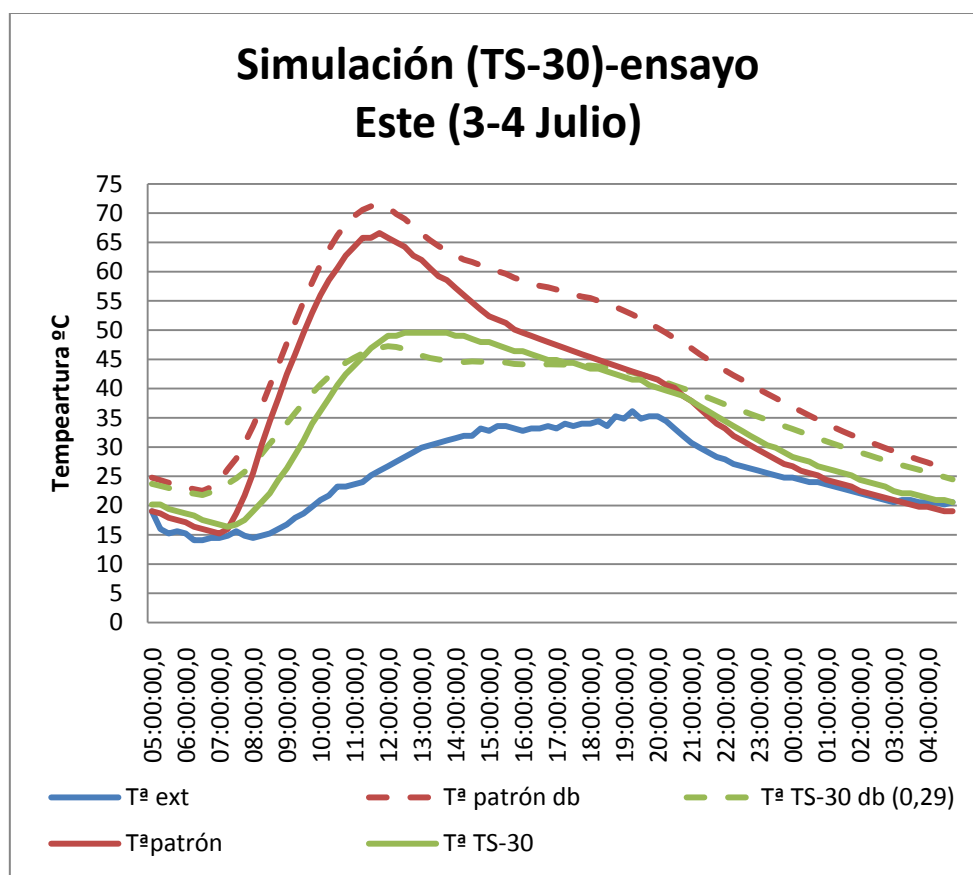
Nótese la diferencia de la hora del amanecer entre la simulación y el ensayo, debido a que son días distintos, debido a la imposibilidad de elegir para la simulación la misma fecha puesto que el programa introduce cambios aleatorios en las condiciones meteorológicas que impiden tener unas condiciones similares a las del ensayo en una fecha determinada.

Por otra parte, a pesar de introducir en el programa los datos muy similares de temperatura exterior, factor solar, radiación y humedad relativa (AEMET) que en el ensayo durante la simulación, el programa hace sus propias consideraciones. El programa debe introducir otros parámetros imposibles de controlar que desvirtúan el resultado final.



VIDRIO TS-30





Al observar y comparar las dos gráficas anteriores superpuestas en una tercera, se observa que mientras que existe una igualdad relativa en el vidrio patrón (doble acristalamiento 6/8/6) entre el ensayo físico (línea continua roja) y la simulación (línea discontinua roja), hay una leve diferencia en el vidrio de control solar de 5°C de diferencia a las 19h (líneas verde continua y discontinua).

Con el objetivo de llegar a una validación de los resultados del programa de simulación, se va a proceder a calcular el Factor solar efectivo en ese momento del vidrio de control solar y aplicarlo a la simulación.

Para ello se parte de los siguientes datos de partida:

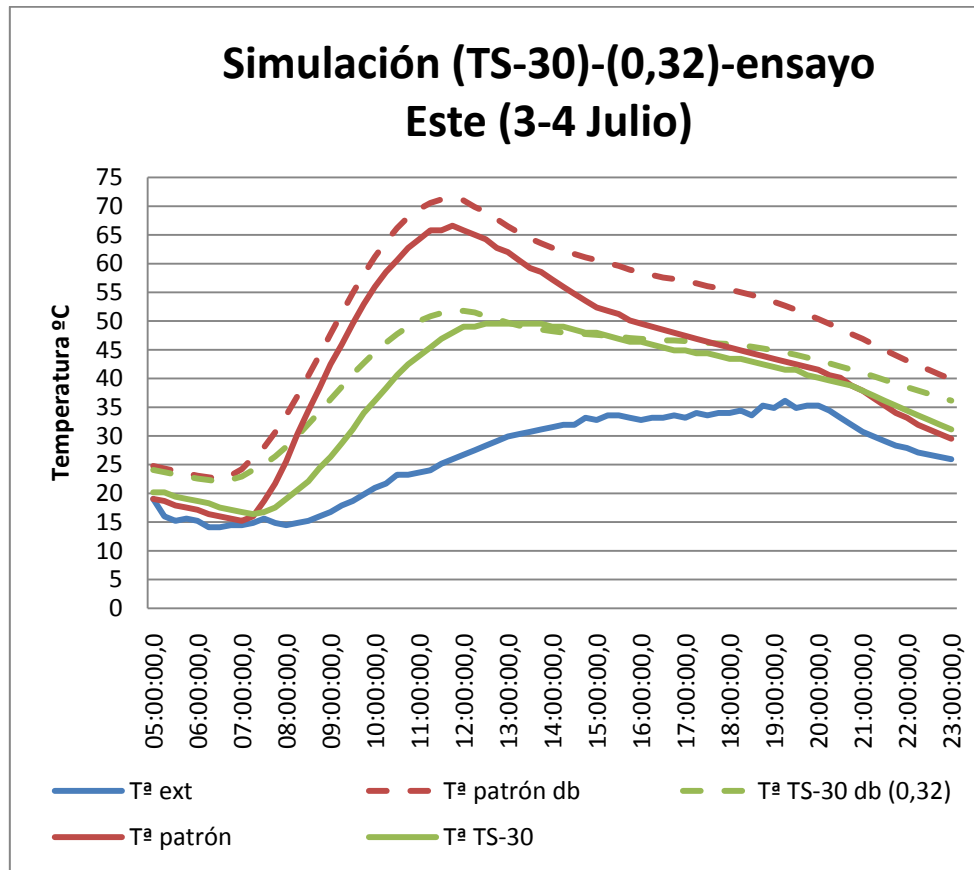
- $F_{S1}=0,72$
- $F_{S2}=0,29$
- $U_1=3.031$

$U_2=2.7$  El factor solar del vidrio a estudiar sería:

$$F_s = 1 - \frac{E_{R2}}{E_1} = 1 - \frac{213.23}{313.91} = 0.32 \text{ w/mK}$$

El factor solar obtenido (0.32) es un 10% superior al dado por el fabricante (0.29) TS-30.

Puesto que el factor solar del vidrio ensayado queda por encima al que supuestamente tenía dado por el fabricante se ha modificado la simulación aplicando el factor solar efectivo del vidrio TS-30 obtenido ( $g=0.32$ ), resultando la siguiente gráfica.



#### 8.1.1.3. CONCLUSIONES PARCIALES SOBRE CAPTACIÓN.

- Los ensayos permiten tener una imagen muy aproximada del comportamiento energético de los vidrios de control solar.
- El factor solar  $g$  medido es siempre superior al dado por el fabricante. Esta diferencia es más acusada en los ensayos a Oeste.
- Los resultados de la simulación reproducen de manera bastante similar los resultados experimentales, si bien, como ya se dijo en simulación, ha habido que ajustarlos aumentando el aislamiento en el modelo de la simulación.
- Los resultados de la simulación son más precisos en el caso de la captación a Este que a Oeste.
- Para ajustar las simulaciones ha habido que aumentar el factor solar en todas ellas para conseguir mayor precisión con los resultados experimentales.

- El desajuste en la hora del amanecer responde a que las simulaciones se han hecho en días diferentes a pesar de que se ha intentado buscar los más parecidos a los días de calendario y de condiciones meteorológicas.

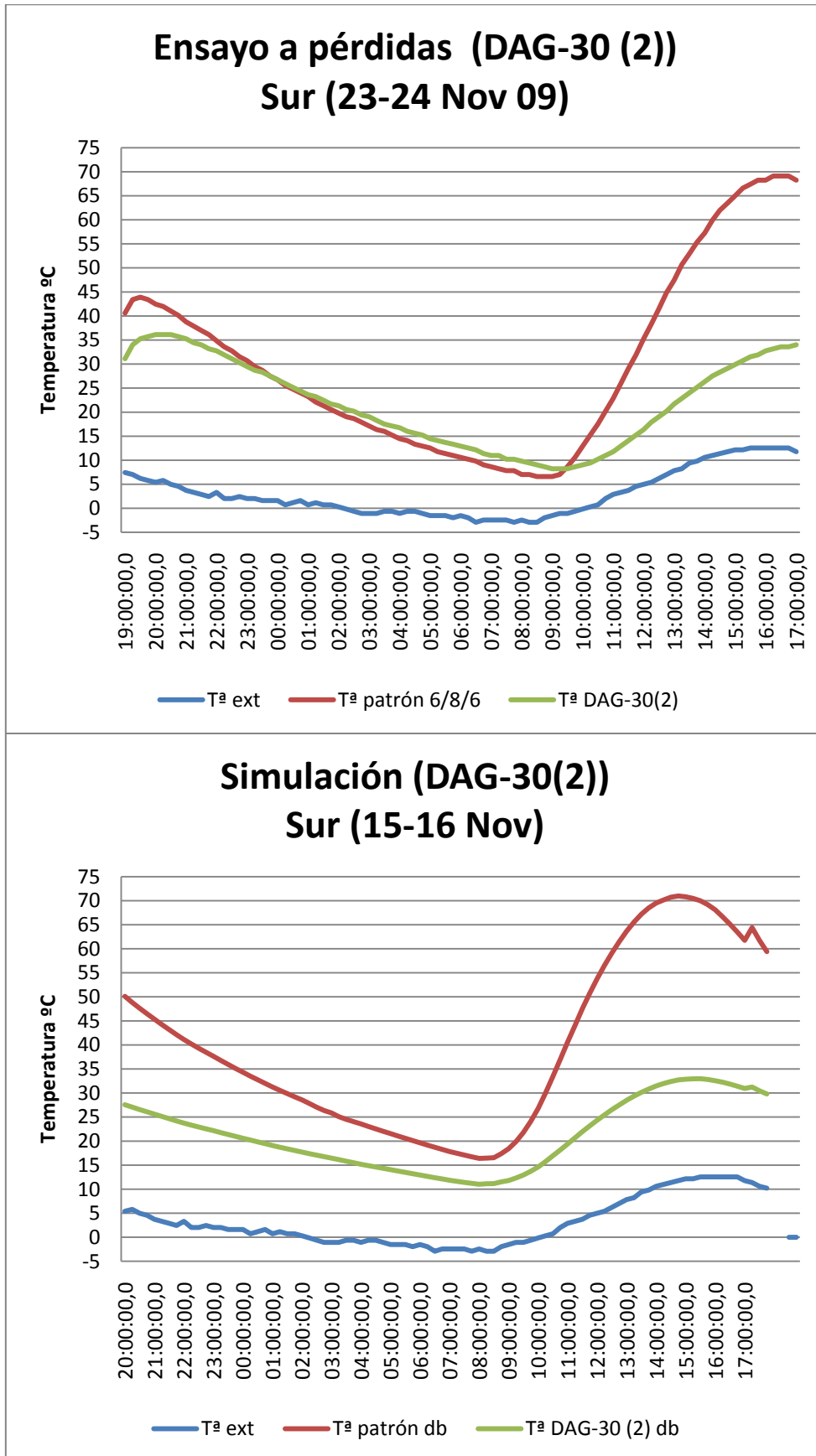
**8.1.2. ENSAYOS A PÉRDIDAS.**

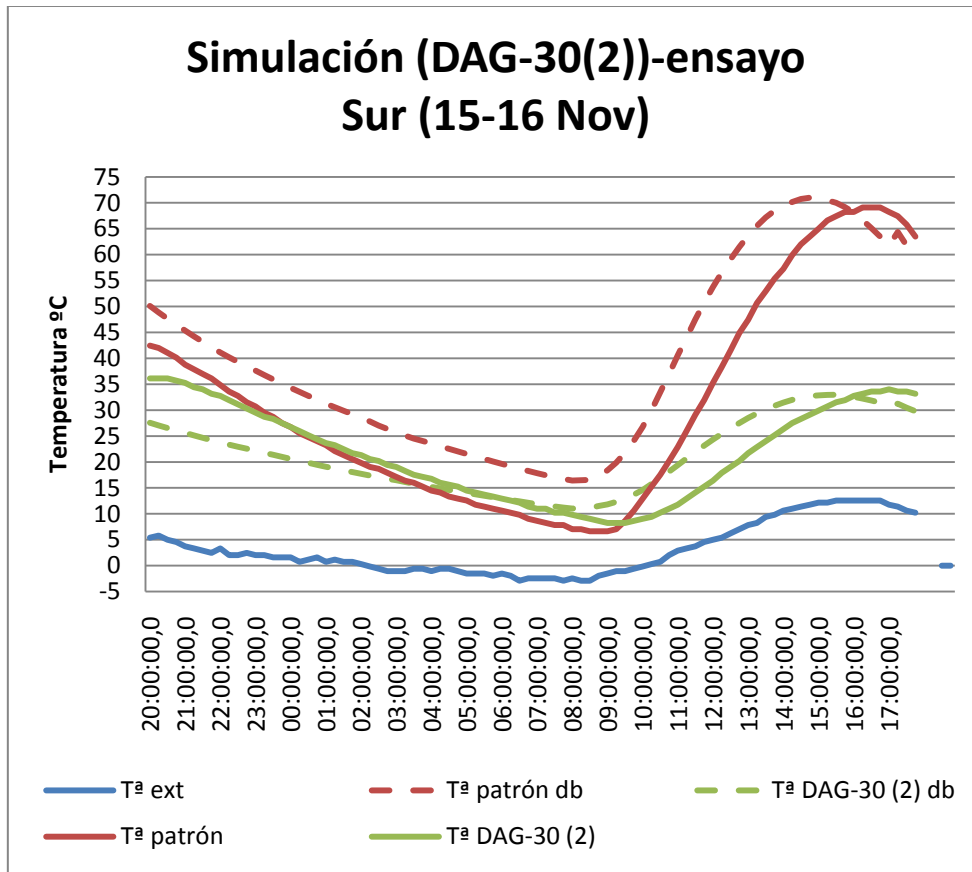
Se exponen las características de los vidrios de control solar ensayados, tanto en proceso empírico como mediante simulación.

Tabla 8-II. Tabla de características vidrios de control solar.

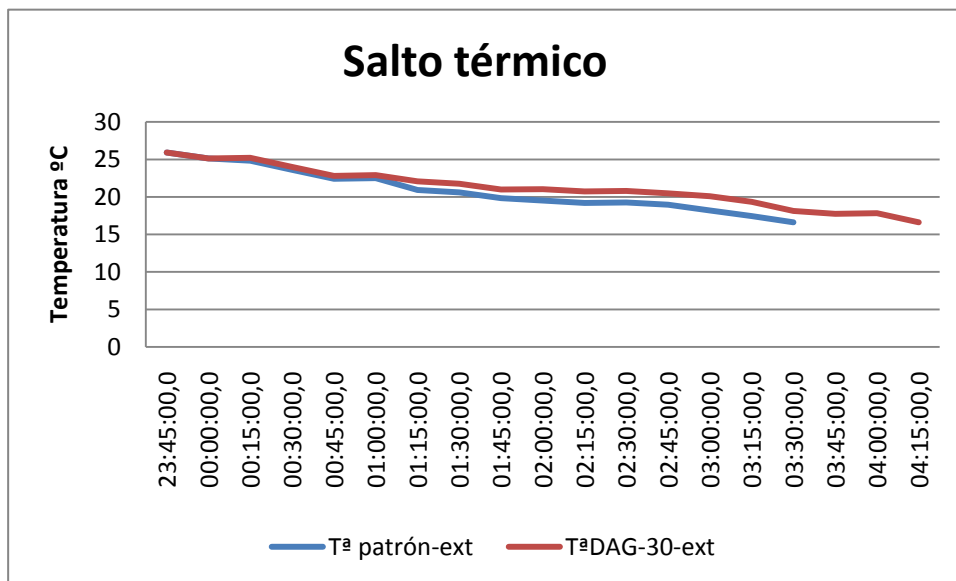
<b>TABLA DE COMPARACIÓN DE VIDRIOS</b>					
<b>Nombre de vidrio</b>	<b>Procedencia de los Datos</b>	<b>Composición</b>	<b>U W/m<sup>2</sup>K</b>	<b>Tv (tanto por uno)</b>	<b>g (factor solar) (tanto por uno)</b>
<b>SUPER E. Bajo emisor</b>	Empresa	6/12/6, compuesto por vidrio incoloro y capa metálica bajo emisiva Super-E, y cámara de aire 100% puro.	1.7	0.73	0.56
<b>AN-62. Bajo emisor</b>	Empresa	6/12/6, compuesto por vidrio incoloro y capa metálica bajo emisiva AN-62, y cámara de aire 100% puro.	1.7	0.62	0.43
<b>DAG-30. Bajo emisor</b>	Empresa	6/12/6, compuesto por vidrio incoloro y capa metálica bajo emisiva DAG-30, y cámara de aire 100% puro.	1.6	0.27	0.18

DAG30 CARA 2





Para el cálculo del factor U, se toma un mismo salto térmico para ambas curvas en distinta unidad de tiempo, obteniendo la siguiente gráfica.



Partiendo de los datos del vidrio DAG-30: (Datos Anexo 3. Punto 5).

- $U_2=1.6\text{W/m}^2\text{°C}$
- $g_2=0.18\text{ W/m}^2\text{°C}$

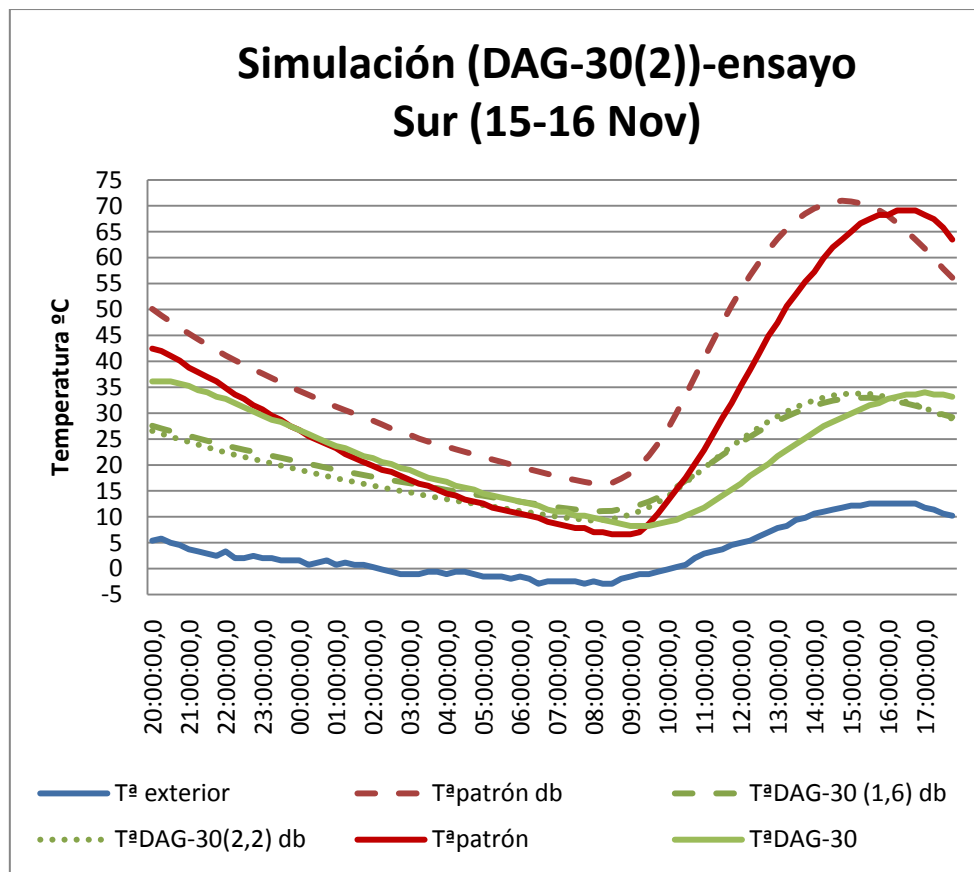
Se obtiene que el valor de la transmitancia efectiva del vidrio es:

$$U_2 = 3,66 \frac{83.74}{100.89} - 0,88 = 2.15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}}$$

Por lo que  $U=2.15\text{ W/m}^2\text{K}$  que al compararlo con el dado por el fabricante es un 34.3% superior al dado por el fabricante ( $1.6\text{ W/m}^2\text{K}$ )

Con el fin de observar la fiabilidad de la simulación, se sustituye el parámetro U al que nos ha salido con el cálculo ( $2.15\text{ W/m}^2\text{K}$ ) resultando un vidrio de un  $g=0.206$  y un U de 2.236.

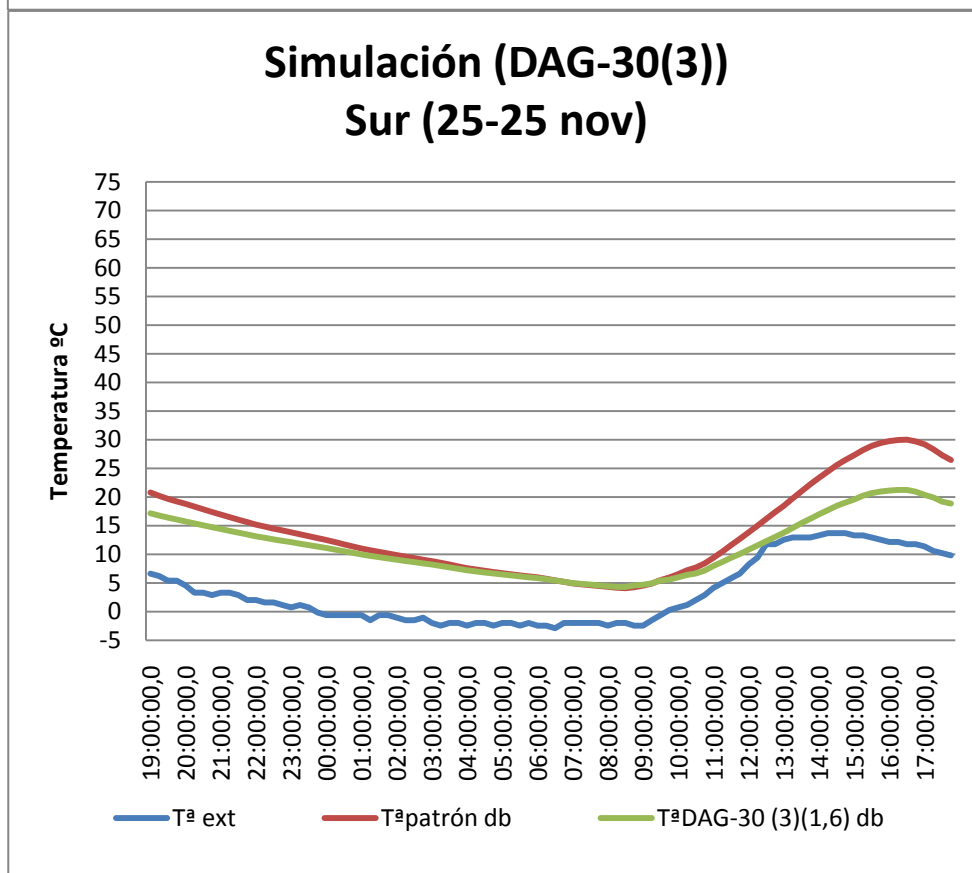
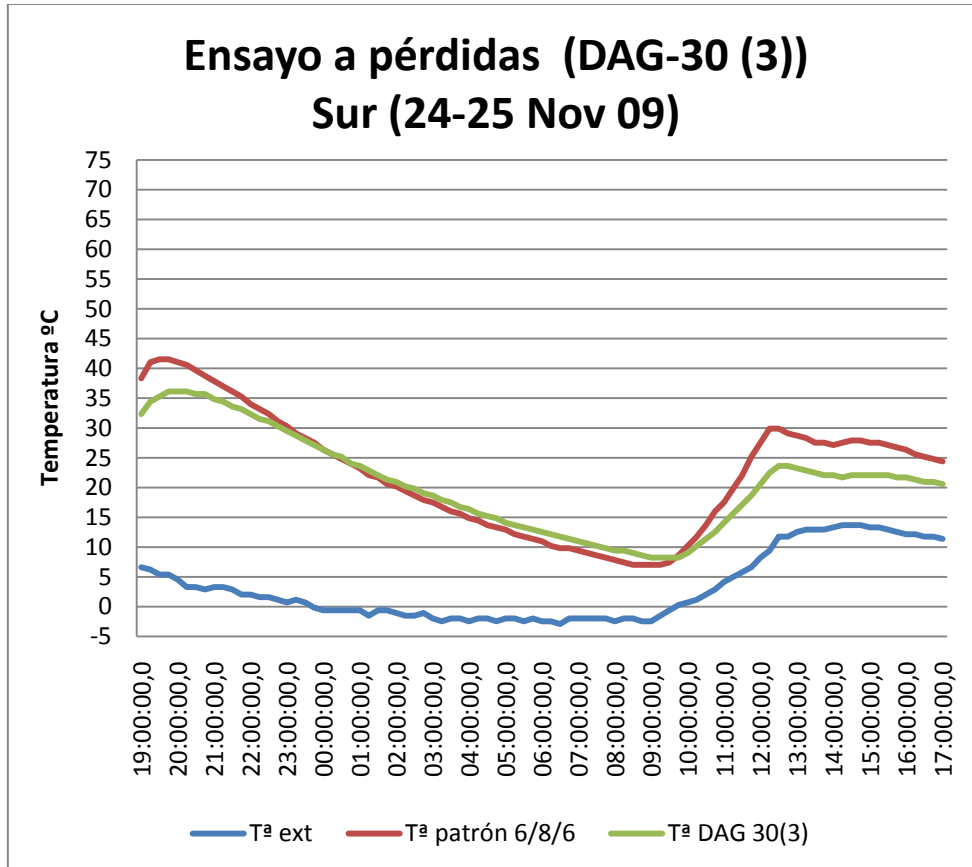
El resultado de la simulación es la siguiente gráfica:

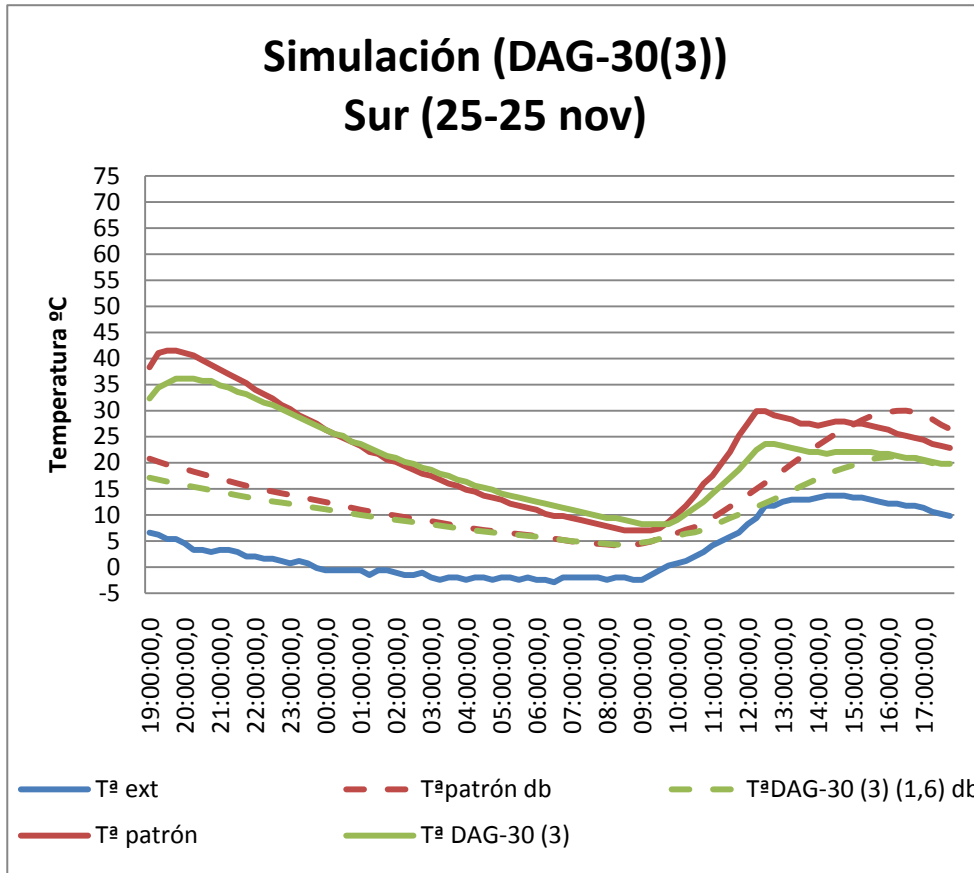


La modificación no mejora sensiblemente el ajuste de la simulación.



DAG-30 CARA 3



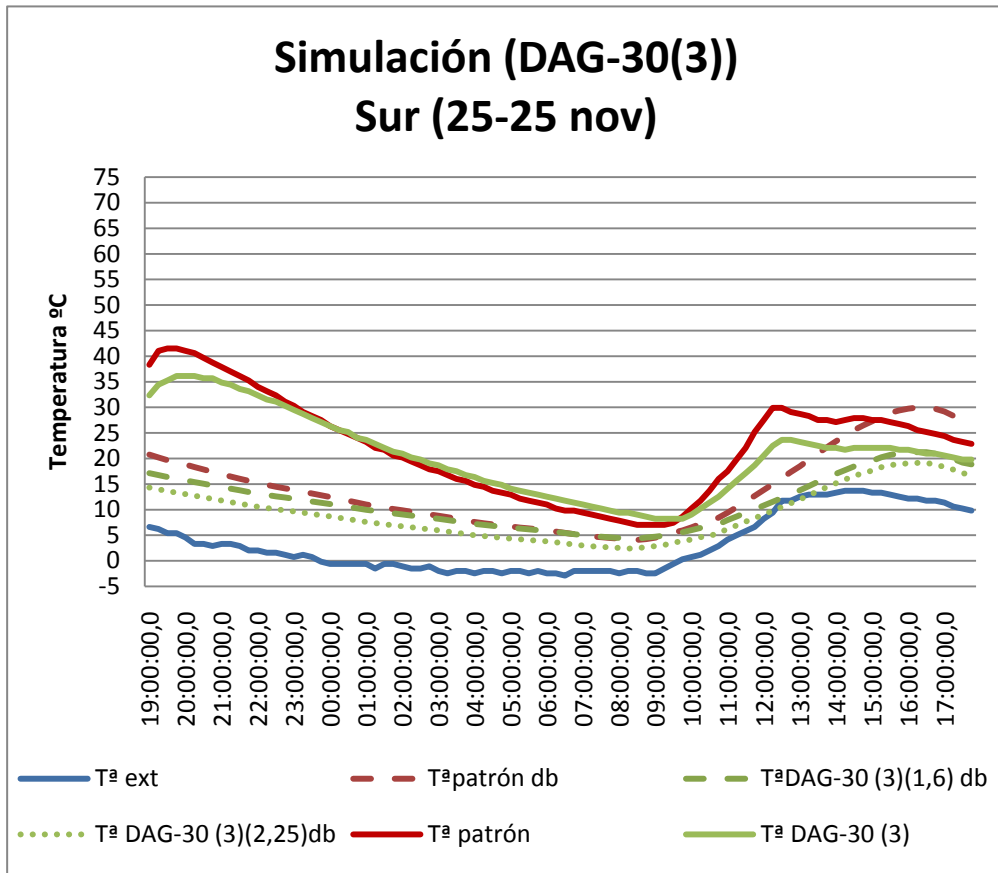


Si calculamos el U efectivo del ensayo experimental análogamente al calculado anteriormente se obtiene un valor de:

$$U_2 = 3,66 \frac{142}{158.79} - 0,88 = 2.32 \frac{W}{m^2°C}$$

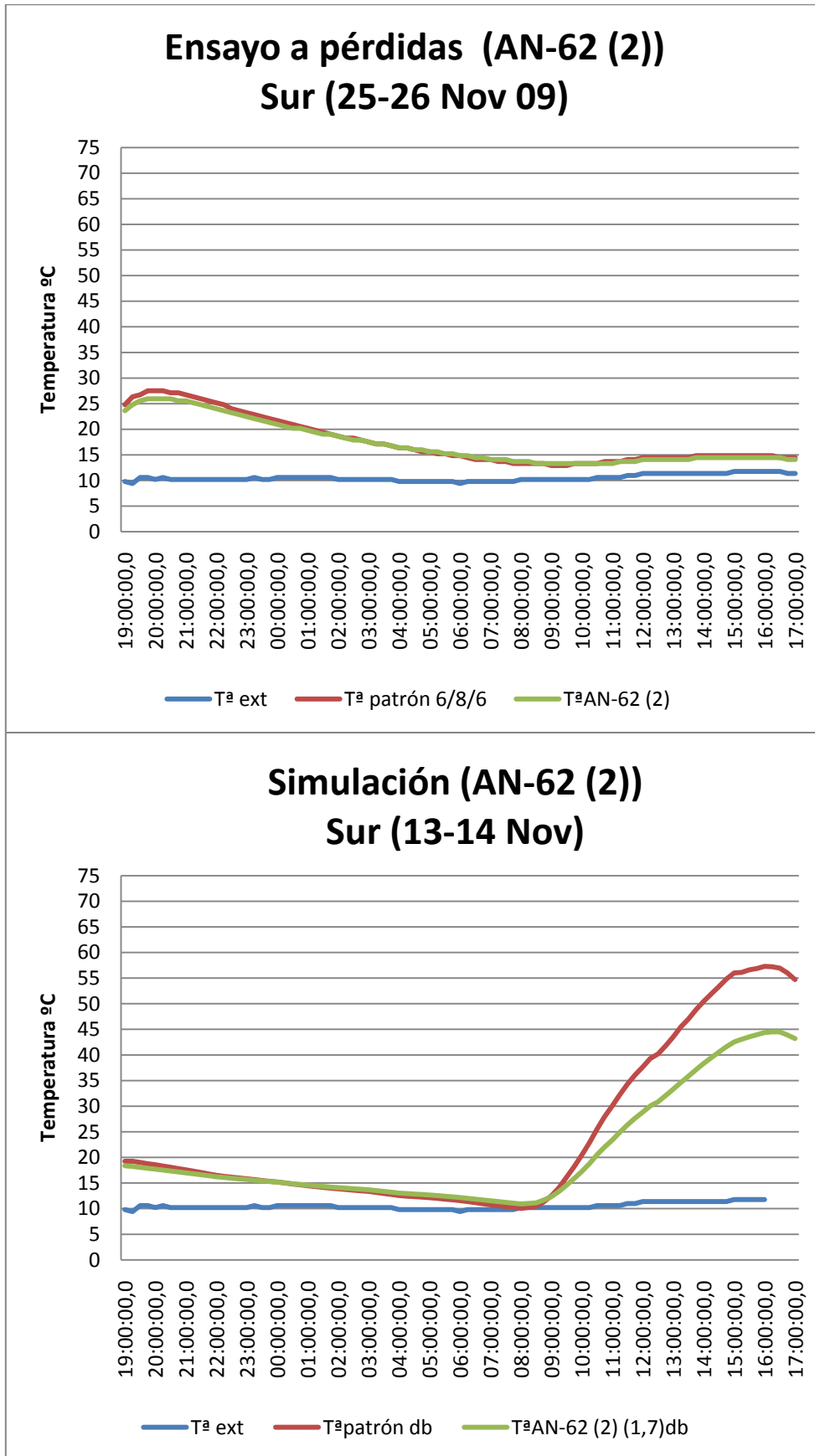
U=2.32 W/m2K que al compararlo con el dado por el fabricante es un 45% superior al dado por el fabricante (1.6 W/m2K).

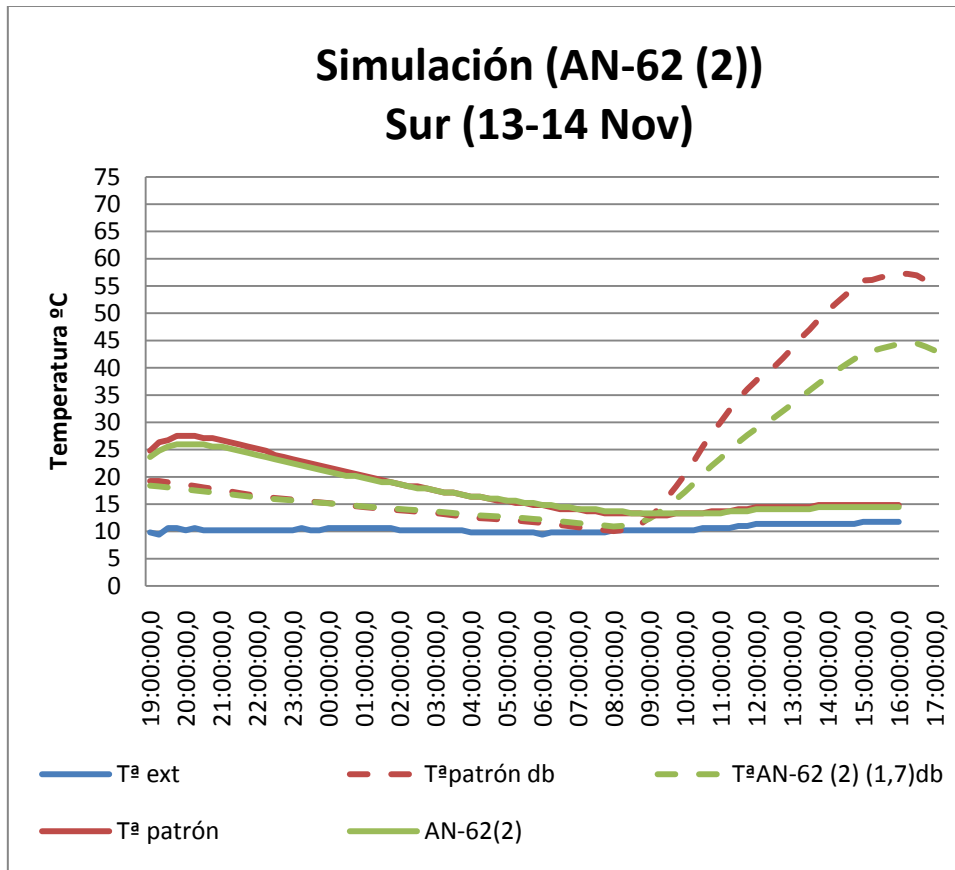
Si sustituimos el valor U dado por el fabricante por el nuevo calculado obtenemos la siguiente simulación:



La modificación no mejora sensiblemente el ajuste de la simulación.

AN-62 CARA 2



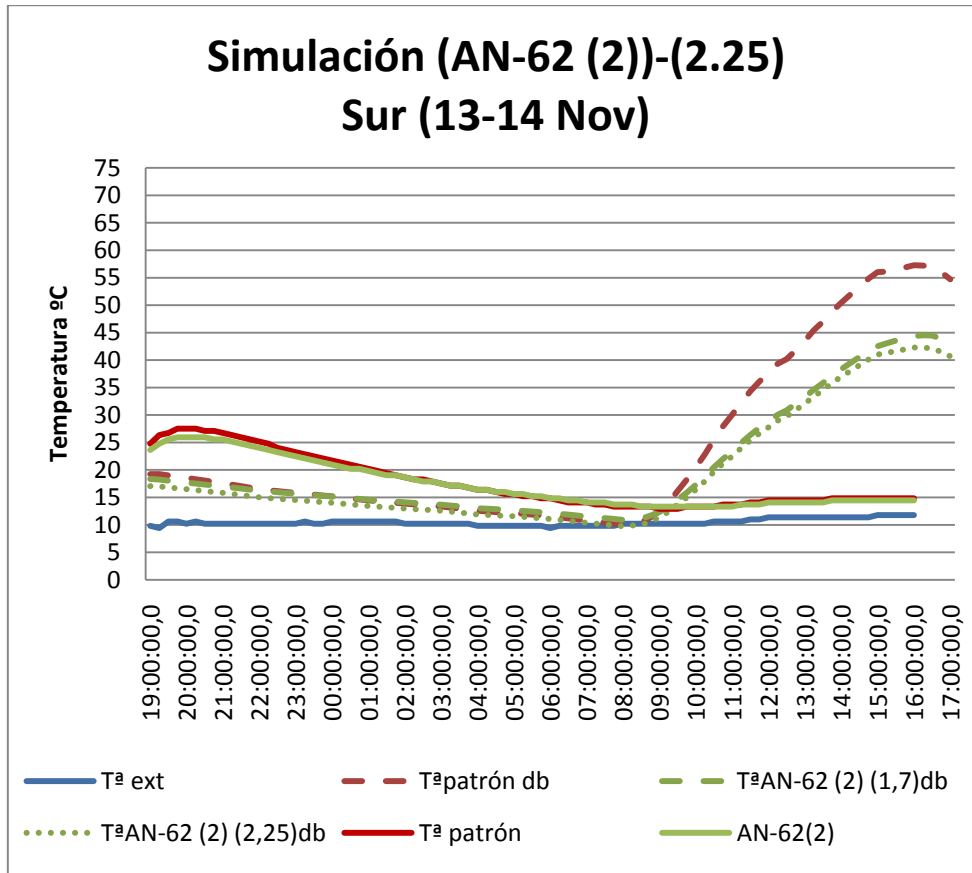


Si calculamos el U efectivo del ensayo análogamente al calculado en el ensayo anterior se obtiene que:

$$U_2 = 3,66 \frac{32,3}{37,3} - 0,88 = 2,21 \frac{W}{m^2 \text{°C}}$$

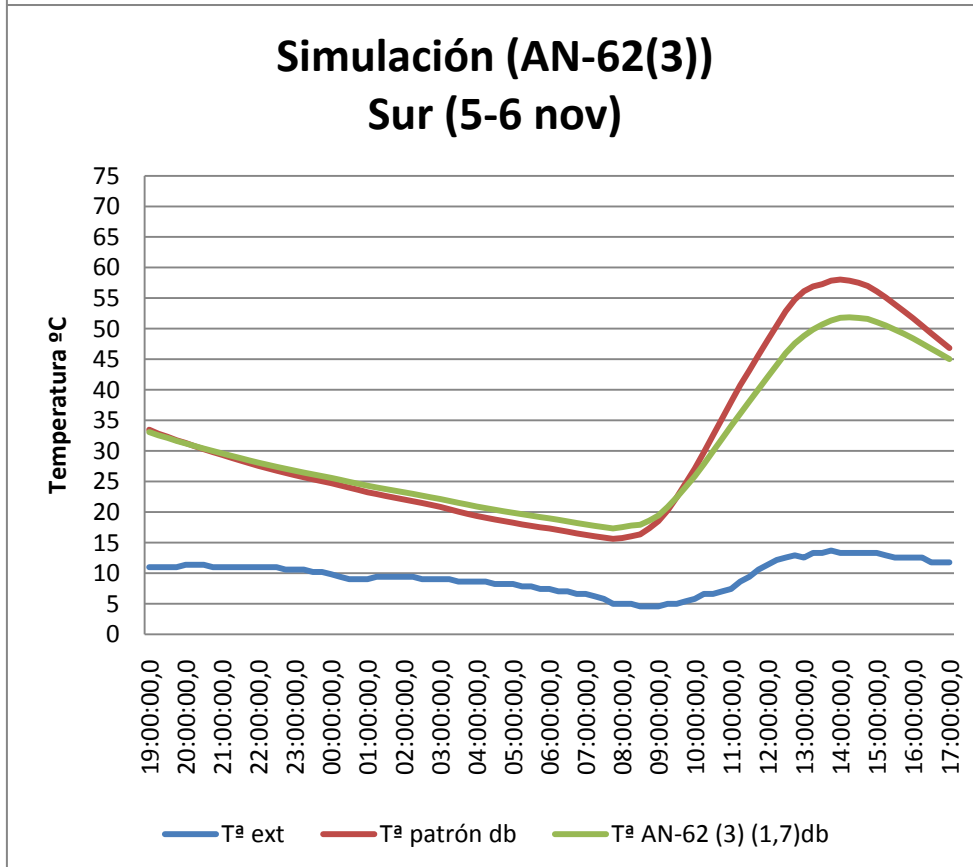
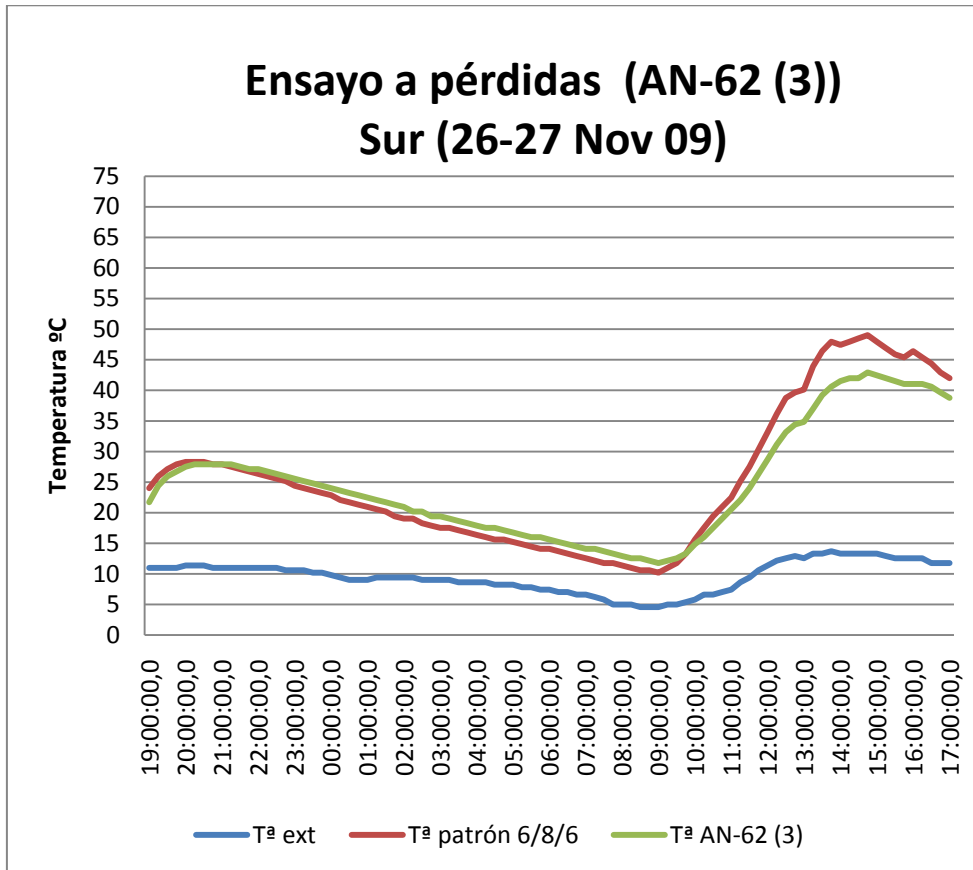
U=2.21 W/m<sup>2</sup>K que al compararlo con el dado por el fabricante es un 30% superior al dado por el fabricante (1.7 W/m<sup>2</sup>K).

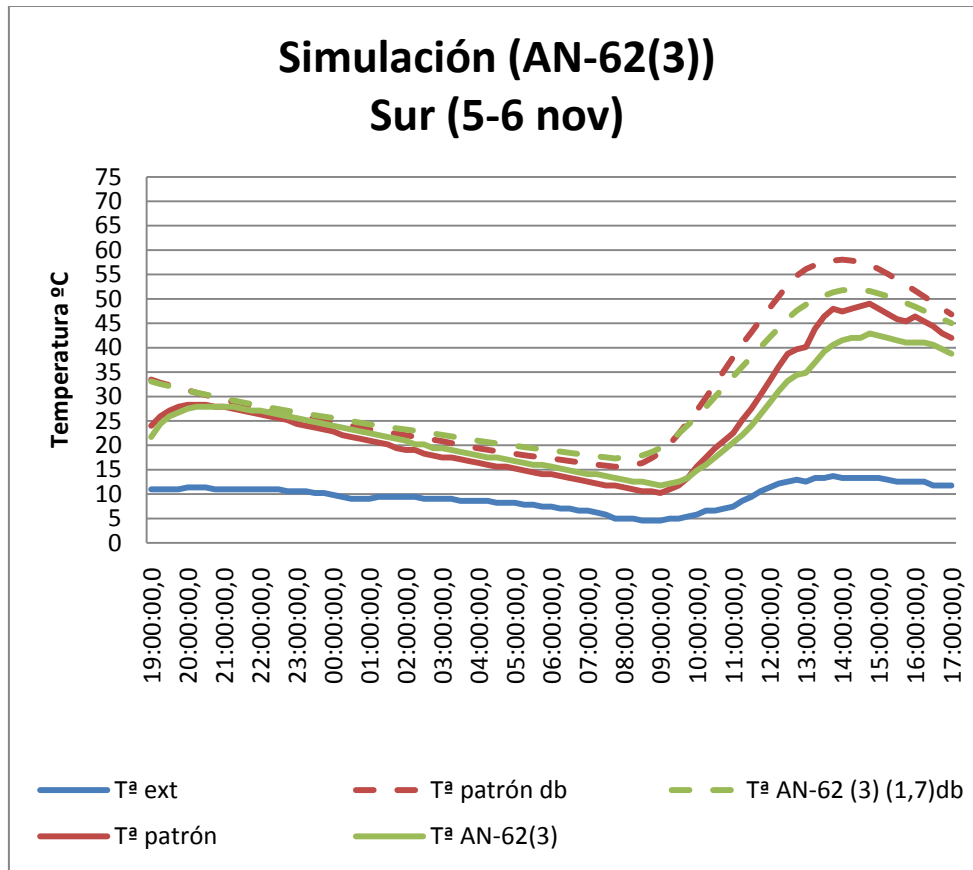
Si aplicamos a la simulación el valor obtenido del U efectivo del ensayo obtenemos la siguiente gráfica:



La modificación no mejora sensiblemente el ajuste de la simulación.

AN-62 CARA 3





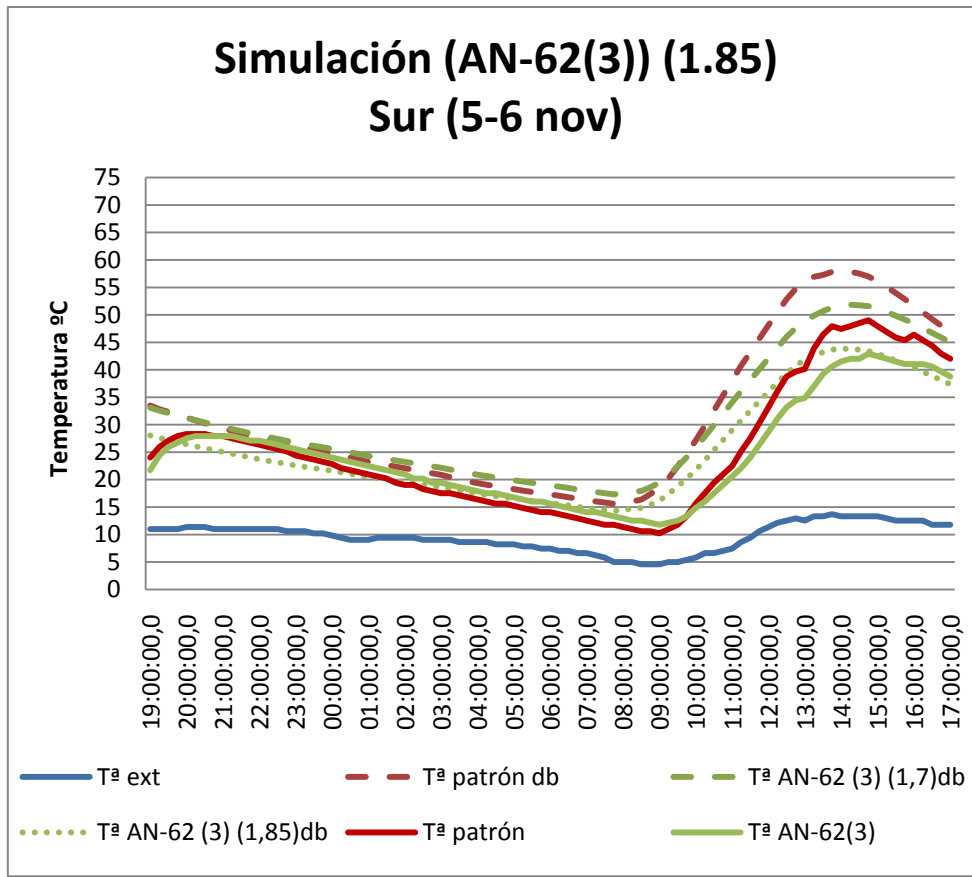
Si calculamos el U efectivo del ensayo análogamente a como se ha calculado análogamente se obtiene que:

$$U_2 = 3,66 \frac{70,6}{94,5} - 0,88 = 1,85 \frac{W}{m^2 \text{°C}}$$

U=1.85 W/m2K que al compararlo con el dado por el fabricante es un 8% superior al dado por el fabricante (1.7 W/m2K).

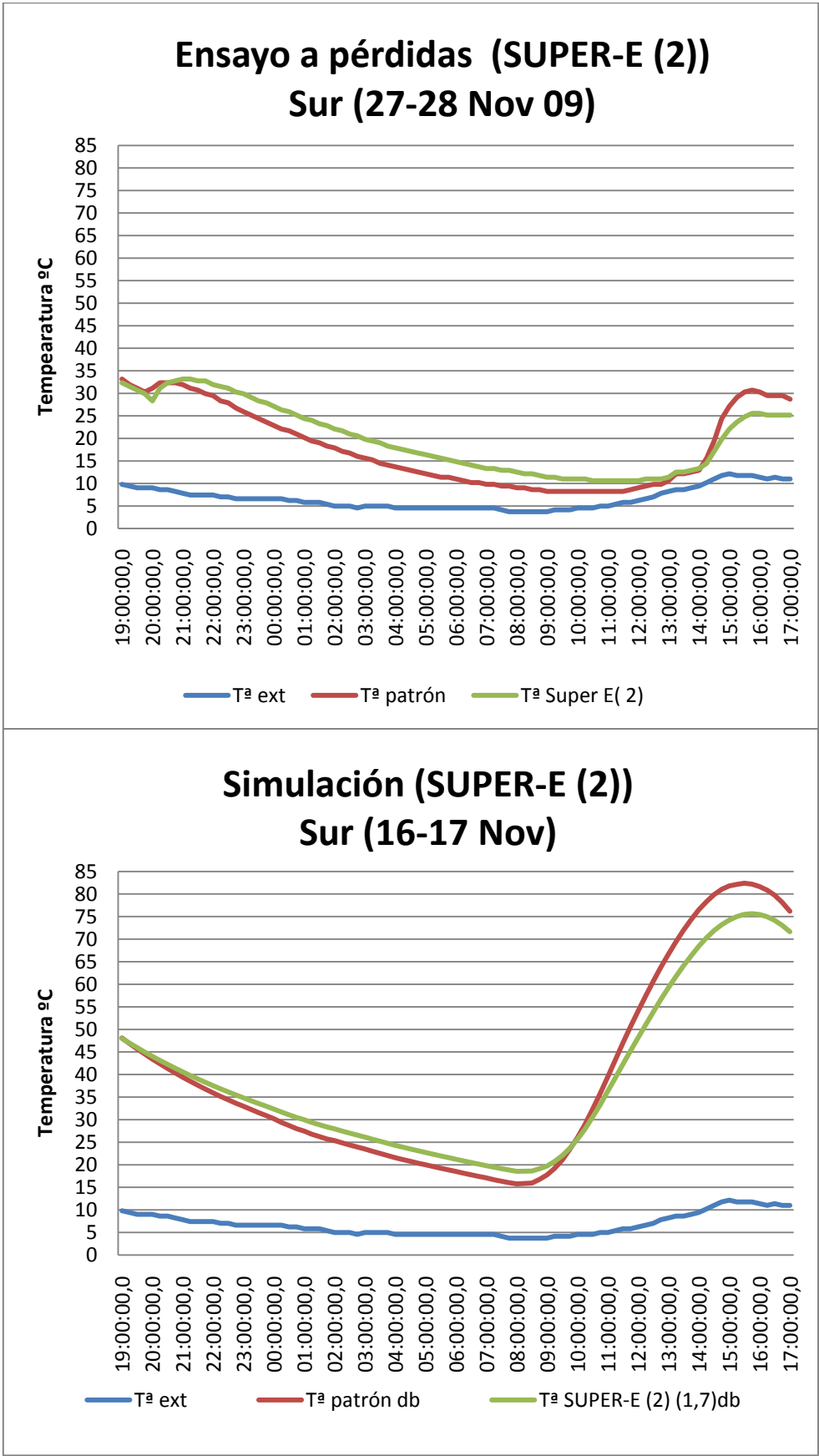
Si lo aplicamos a la simulación:

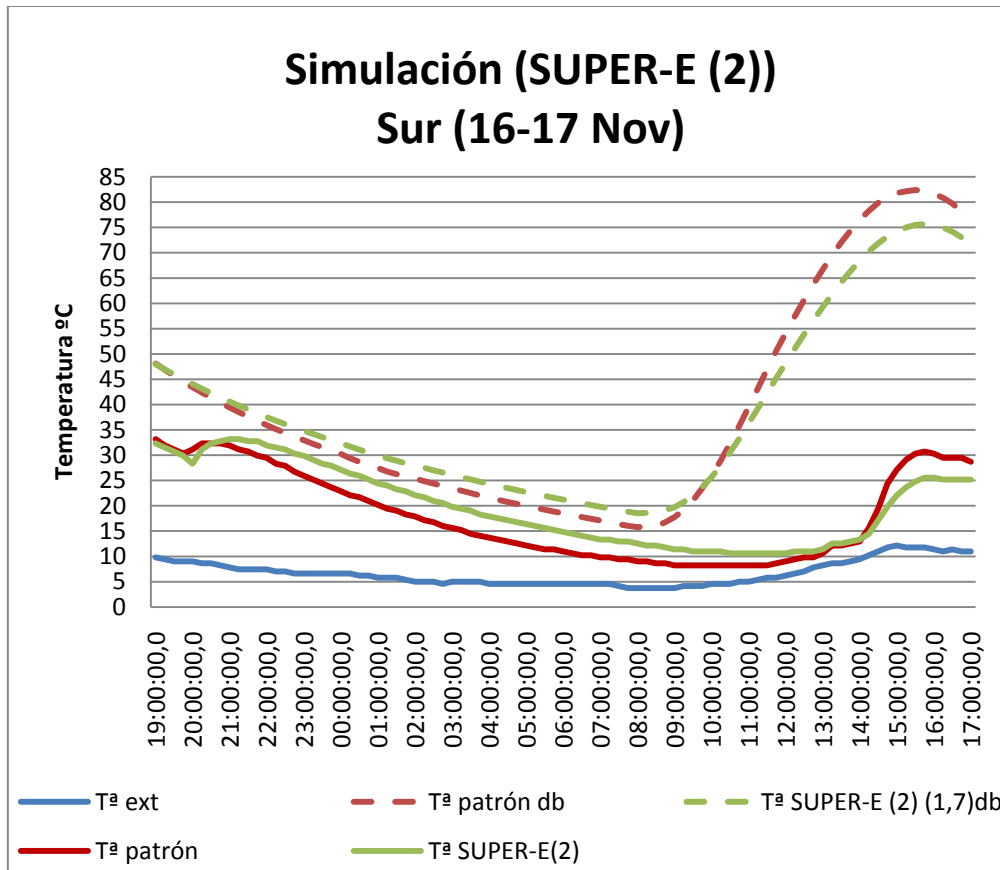




La modificación no mejora sensiblemente el ajuste de la simulación.

**SUPER E CARA 2**



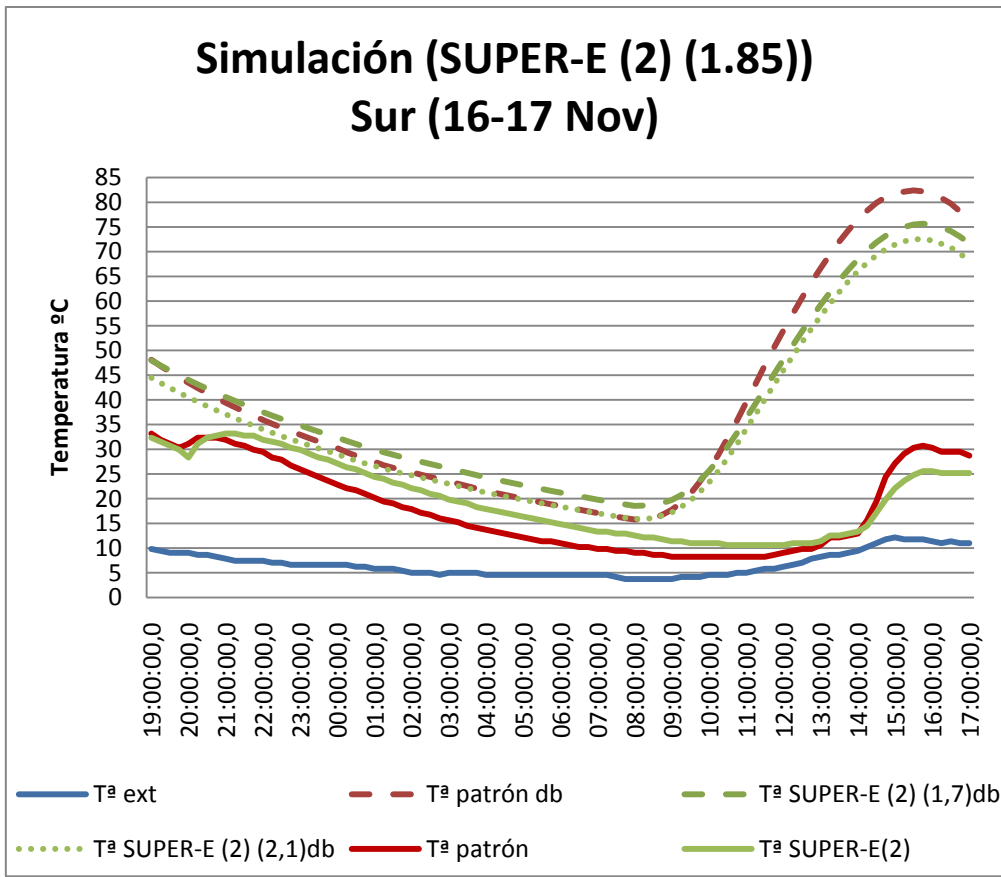


Si calculamos el U efectivo del ensayo análogamente al calculado anteriormente se obtiene que:

$$U_2 = 3,66 \frac{59.625}{75.08} - 0,88 = 2.02 \frac{W}{m^2 \text{°C}}$$

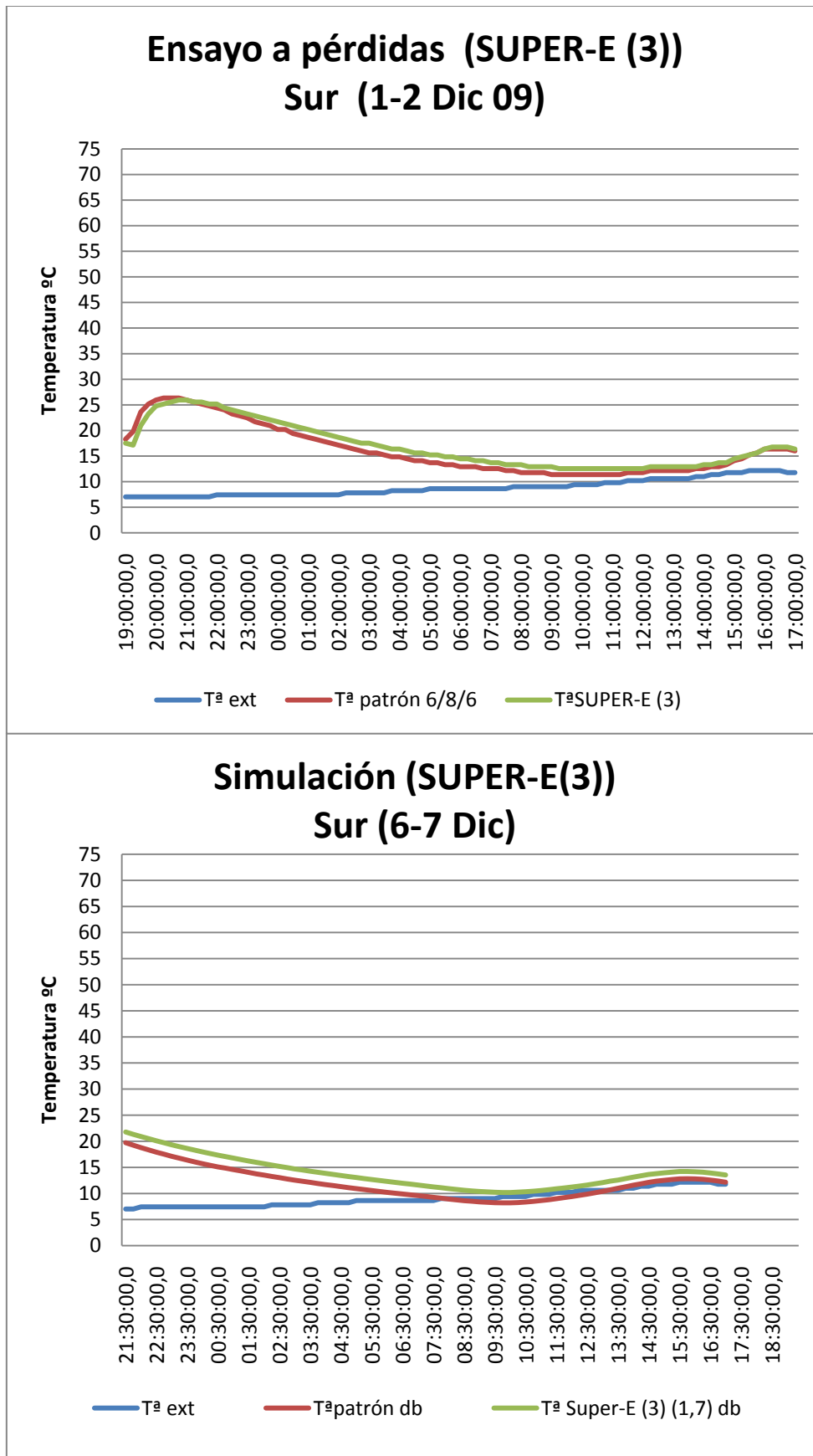
U=2.02 W/m<sup>2</sup>K que al compararlo con el dado por el fabricante es un 18.8% superior al dado por el fabricante (1.7 W/m<sup>2</sup>K)

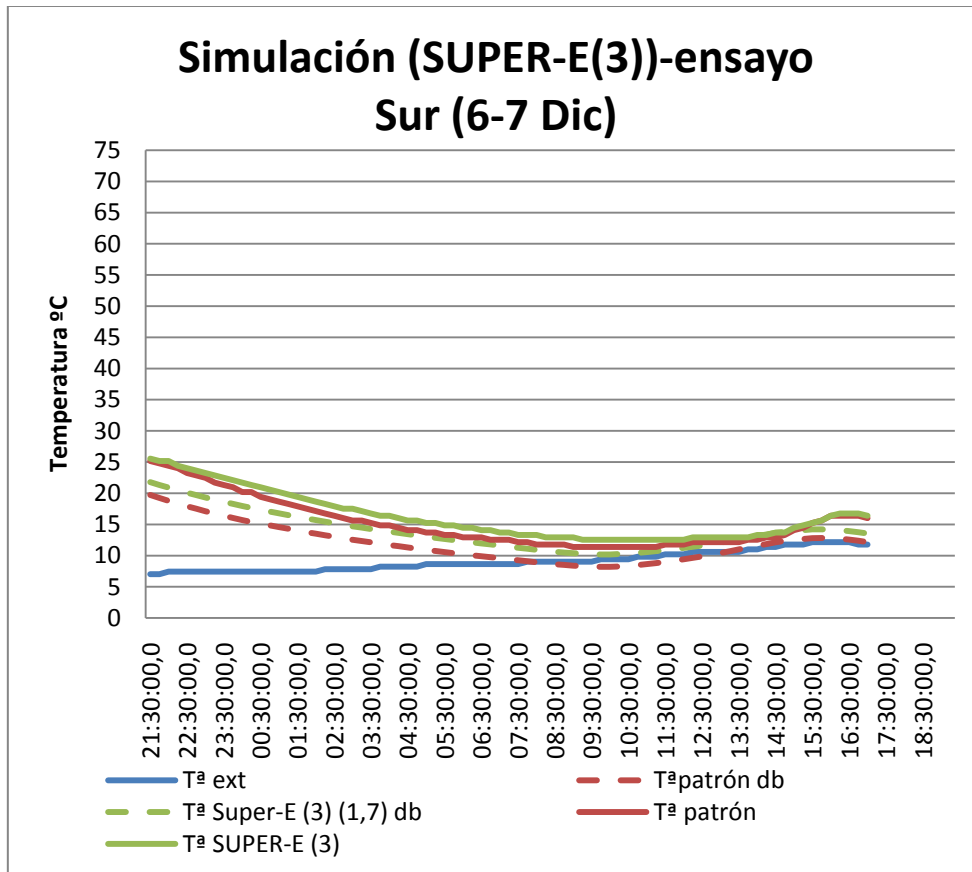
Si aplicamos dicho valor efectivo en la simulación obtenemos la siguiente gráfica:



La modificación no mejora sensiblemente el ajuste de la simulación.

SUPER E CARA 3

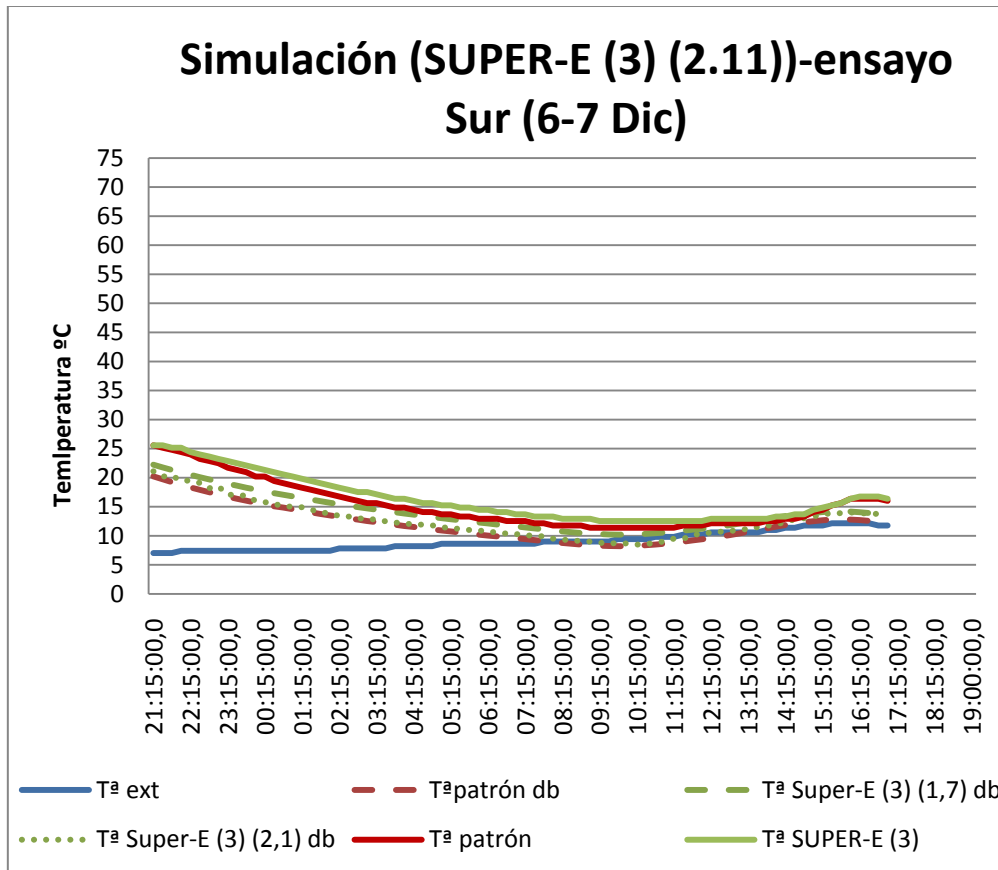




Si calculamos el U efectivo del ensayo análogamente a como se ha calculado anteriormente se obtiene que:

$$U_2 = 3,66 \frac{91,85}{112,18} - 0,88 = 2,11 \frac{W}{m^2 \text{°C}}$$

U=2.11 W/m2K que al compararlo con el dado por el fabricante es un 24.1% superior al dado por el fabricante (1.7 W/m2K).



La modificación no mejora sensiblemente el ajuste de la simulación.

#### 8.1.2.1. CONCLUSIONES PARCIALES SOBRE PÉRDIDAS.

Tras realizar la comparación de simulación y ensayos en régimen de pérdidas podemos afirmar lo siguiente:

- Existe cierta dificultad de la simulación para poder iniciar el ciclo de pérdidas a una temperatura fijada, tal y como se ha comentado en el punto (6.7.2.2.: Ciclo de ensayos. Simulaciones a pérdidas).
- Tanto en las simulaciones como en los ensayos se observa un mejor comportamiento del vidrio bajo emisivo con respecto al vidrio patrón, aunque dicho comportamiento está por debajo de lo esperado.
- La modificación del parámetro U en la simulación no plantea diferencias apreciables, en el comportamiento del vidrio bajo emisivo en las simulaciones.
- Aunque la simulación reproduce de manera similar el vidrio patrón y el bajo emisivo, sin embargo la falta de precisión en la simulación es mayor que las diferencias existentes entre un vidrio y otro.
- Finalmente como resumen hay que constatar que el fenómeno de las pérdidas es de un orden tan fino que escapa a la precisión de ensayos y

simulaciones. Su estudio más preciso conllevaría modificaciones importantes en el ensayo (mayor aislamiento, fuentes energía etc.).

### **8.1.3. CONSIDERACIONES SOBRE LA COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DE SIMULACIÓN.**

De este modo tras la comparación realizada se observa lo siguiente:

- Es de primer interés conseguir validar y ajustar las simulaciones energéticas; por ello supone un gran avance en el análisis de la eficiencia energética de los proyectos.
- Con esta comparación se ha dado un paso de vital importancia en el intento de afinar al máximo la precisión de la simulación mediante herramientas informáticas. En este aspecto ha resultado que las simulaciones en captación, y principalmente a Este, se aproximan mucho más a los resultados experimentales, partiendo de la base de los ajustes previos realizados al modelo (aumento de aislamiento). Las captaciones a Oeste también se aproximan, aunque algo menos, mientras que con las simulaciones de los ensayos a pérdidas se obtienen peores resultados.
- Tanto en los resultados experimentales como en las simulaciones se aprecia claramente la influencia de los vidrios de control solar en la reducción de ganancias térmicas. Dicha reducción concuerda razonablemente con el factor solar  $g$  de cada vidrio.
- Tanto en los ensayos como en las simulaciones a pérdidas el comportamiento de los vidrios bajo emisivos es mejor que el patrón, pero tal vez en una proporción insuficiente.
- Tanto en ciclo de ensayos como el de simulaciones y su ulterior comparación permite situar claramente las prestaciones de los vidrios estáticos y convencionales con respecto al patrón, con razonable precisión y condiciones meteorológicas y de intemperie reales, lo que posteriormente va a permitir estimar las prestaciones del vidrio con cámara de agua circulante.

### **8.2. ESTIMACIÓN DE LAS MEJORAS ENERGÉTICAS APORTADAS POR EL VIDRIO CON AGUA CIRCULANTE EN LA CÁMARA.**

A partir de los resultados obtenidos previamente es posible describir con bastante aproximación el comportamiento de los diferentes tipos de vidrios según el ensayo propuesto y efectuar comparaciones entre ellos en lo relativo a captación solar y pérdidas térmicas.

Para ello se han construido unas curvas tipo que describen en primer lugar el comportamiento del vidrio patrón en condiciones de un día típico de solsticio de verano, en captación Este y Oeste, y de un día típico de solsticio de invierno en captación y pérdidas al sur.



Las curvas se han realizado utilizando una media ponderada de los valores experimentales obtenidos en los días más significativos, construyendo la curva ideal de comportamiento del ensayo en un día típico de los escenarios estudiados.

Además se puede definir una zona sombreada donde se situarían los vidrios comerciales disponibles en el mercado, tanto los ensayados como otros que podrían dibujarse por interpolación entre las curvas presentadas en función de su factor solar o la transmitancia térmica U.

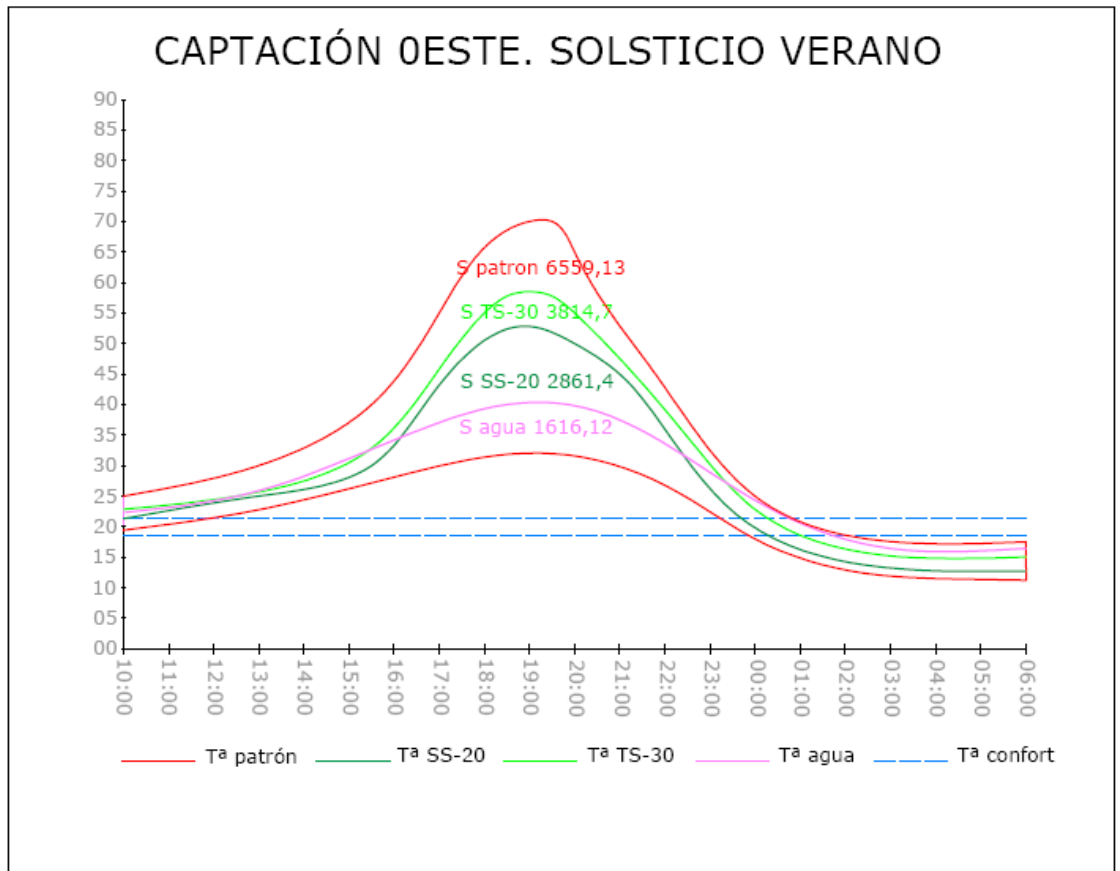
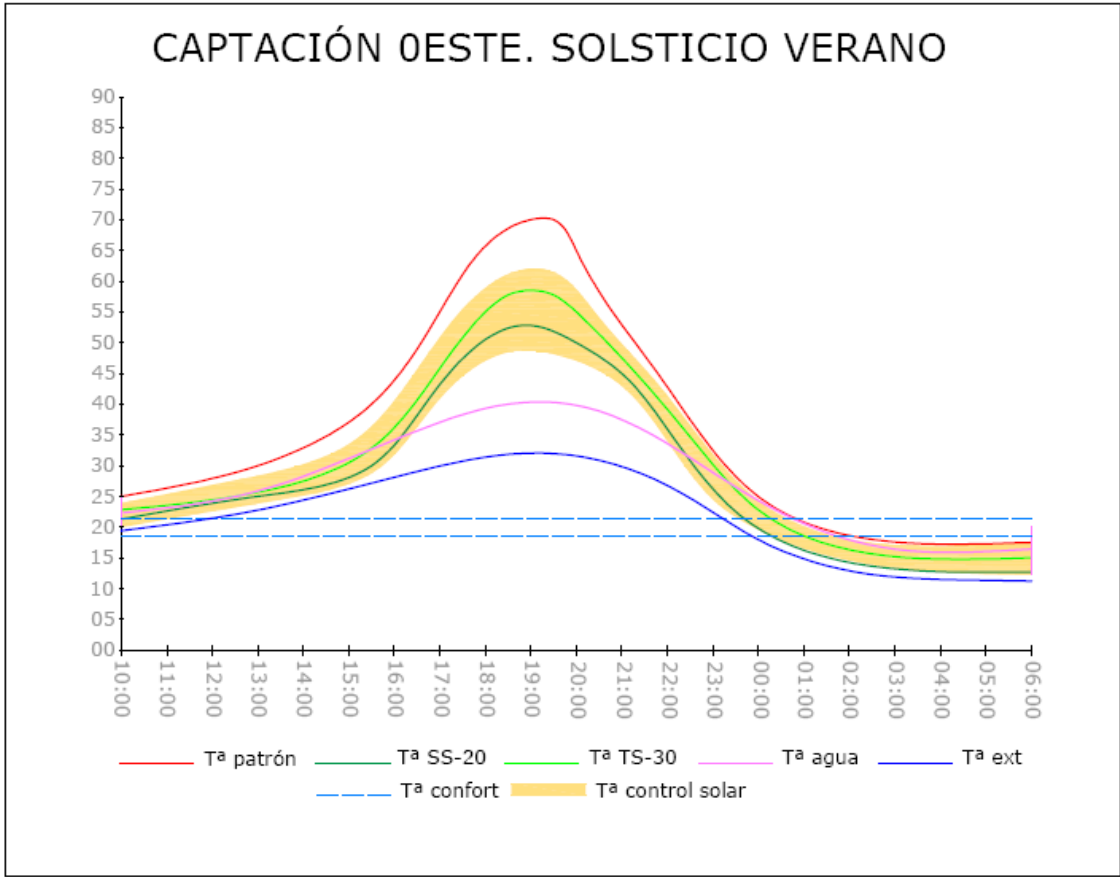
Igualmente es factible dibujar la curva típica de temperaturas exteriores de los días tipo citados.

Finalmente se pueden representar las curvas obtenidas con vidrios con agua según los resultados experimentales conseguidos. Ello permite comparar ahorros energéticos de refrigeración con respecto al vidrio patrón o con respecto a un vidrio de control solar, debido a que la energía necesaria para mantener un salto térmico a lo largo del tiempo es proporcional al área englobada por la curva que representa ese salto térmico y el eje de abscisas.

Las curvas correspondientes al vidrio con agua circulante en su cámara corresponden a los mejores resultados experimentales obtenidos sin consumo energético en la climatización del agua, es decir a libre refrigeración del agua en verano y con aprovechamiento del agua precalentada por captación excedente en invierno.

Como ejemplo se calcula el beneficio energético de la utilización del vidrio con agua circulante sobre uno de control solar o el patrón para reducir las ganancias debidas al efecto invernadero del vidrio, alcanzándose un valor comparativo al ahorro de un 76% en Oeste, manteniendo la transparencia, lo que es equivalente a un factor solar del 17%.

Igualmente en pérdidas si se utiliza agua climatizada a baja temperatura (33°C) se puede reducir el parámetro U prácticamente a 0, aprovechando además fuentes de energías renovables, como puede ser la solar térmica, pilotes geotérmicos y la propia generada por el vidrio en captación diurna (ver ensayo nº 46).



Si:

- S patrón es la superficie englobada por la curva patrón y la temperatura exterior.
- S TS-30 es la superficie englobada por la curva del vidrio de control solar TS-30 y la temperatura exterior.
- S SS-20 es la superficie englobada por la curva del vidrio de control solar SS-20 y la temperatura exterior.
- S agua es la superficie englobada por la curva del agua refrigerada y la exterior.

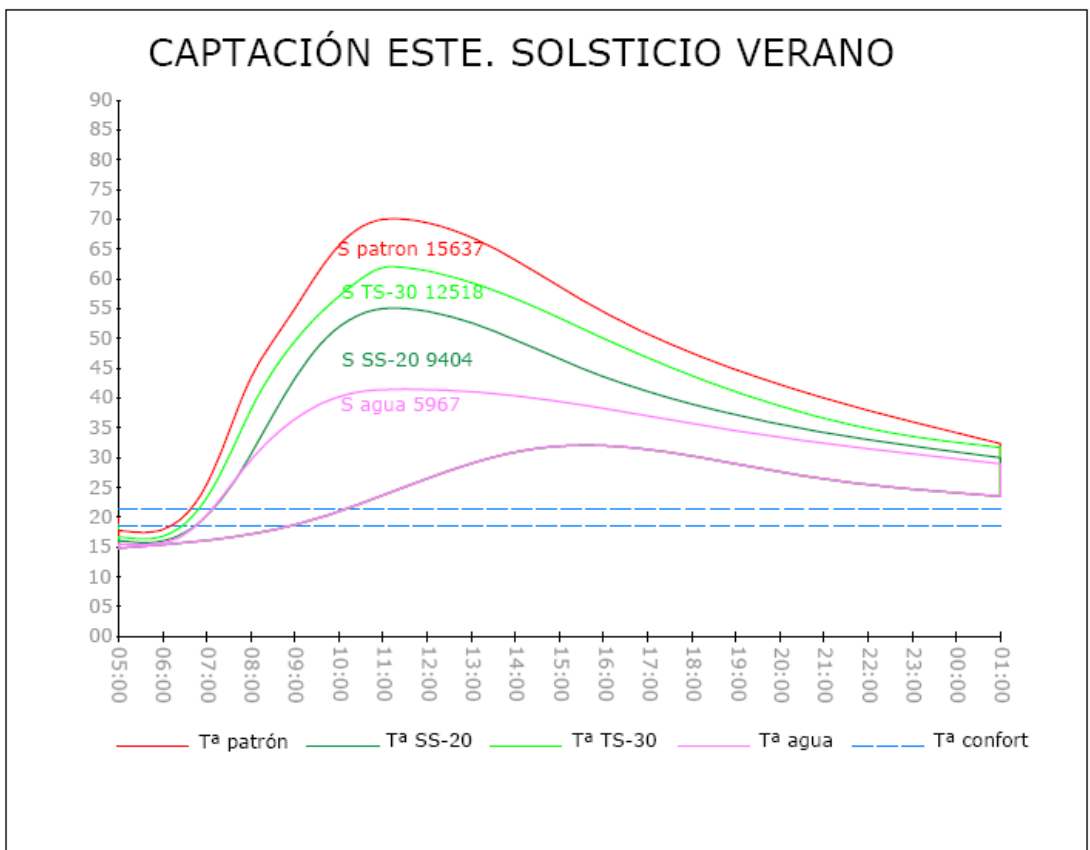
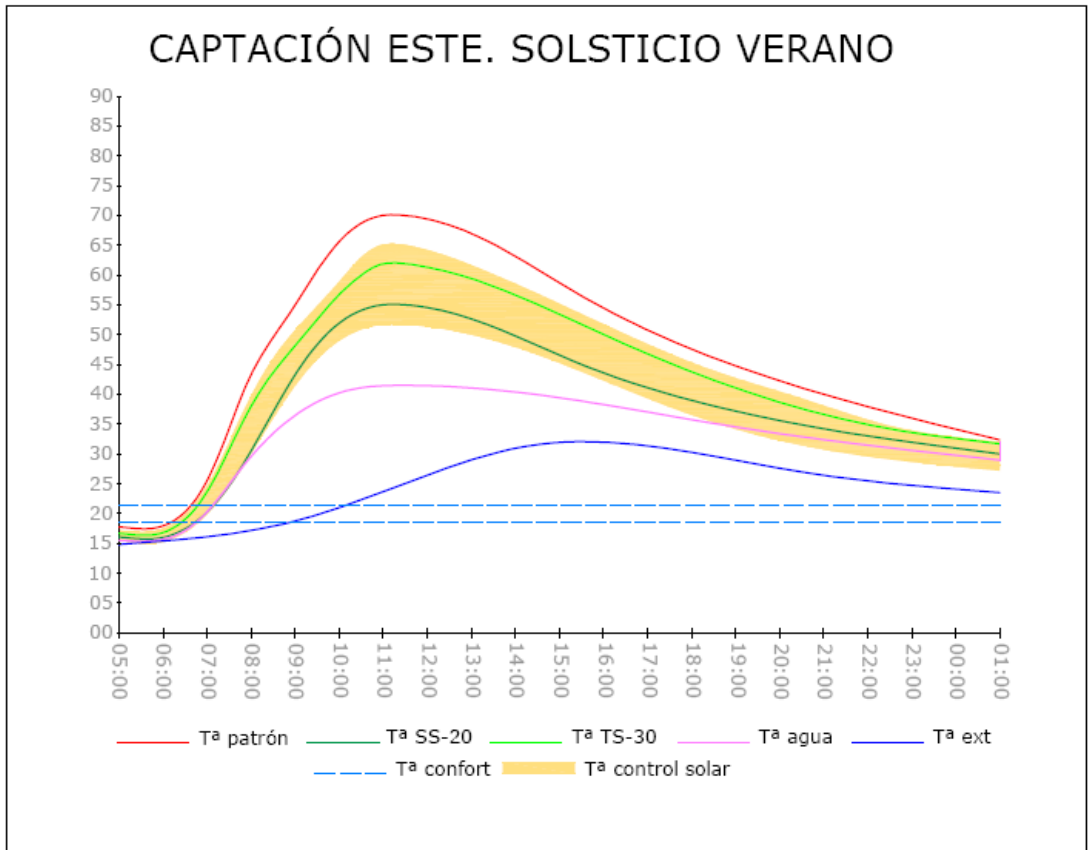
Y dividiendo cada superficie entre la superficie patrón podemos decir que:

$S_{ts-30}/S_{patrón}=0,58$ . 40%

$S_{ss-20}/S_{patrón}=0,43$  57%.

$S_{agua}/S_{patrón}=0,24$ . 76%

- El vidrio TS-30 mejora un 40% con respecto al vidrio patrón en captación, en orientación Oeste.
- El vidrio SS-20 mejora un 57% con respecto al vidrio patrón en captación, en orientación Oeste.
- El vidrio con agua mejora un 76% con respecto al vidrio patrón en captación, en orientación Oeste.



Si:

- S patrón es la superficie englobada por la curva patrón y la temperatura exterior.
- S TS-30 es la superficie englobada por la curva del vidrio de control solar TS-30 y la temperatura exterior.
- S SS-20 es la superficie englobada por la curva del vidrio de control solar SS-20 y la temperatura exterior.
- S agua es la superficie englobada por la curva del agua refrigerada y la temperatura exterior.

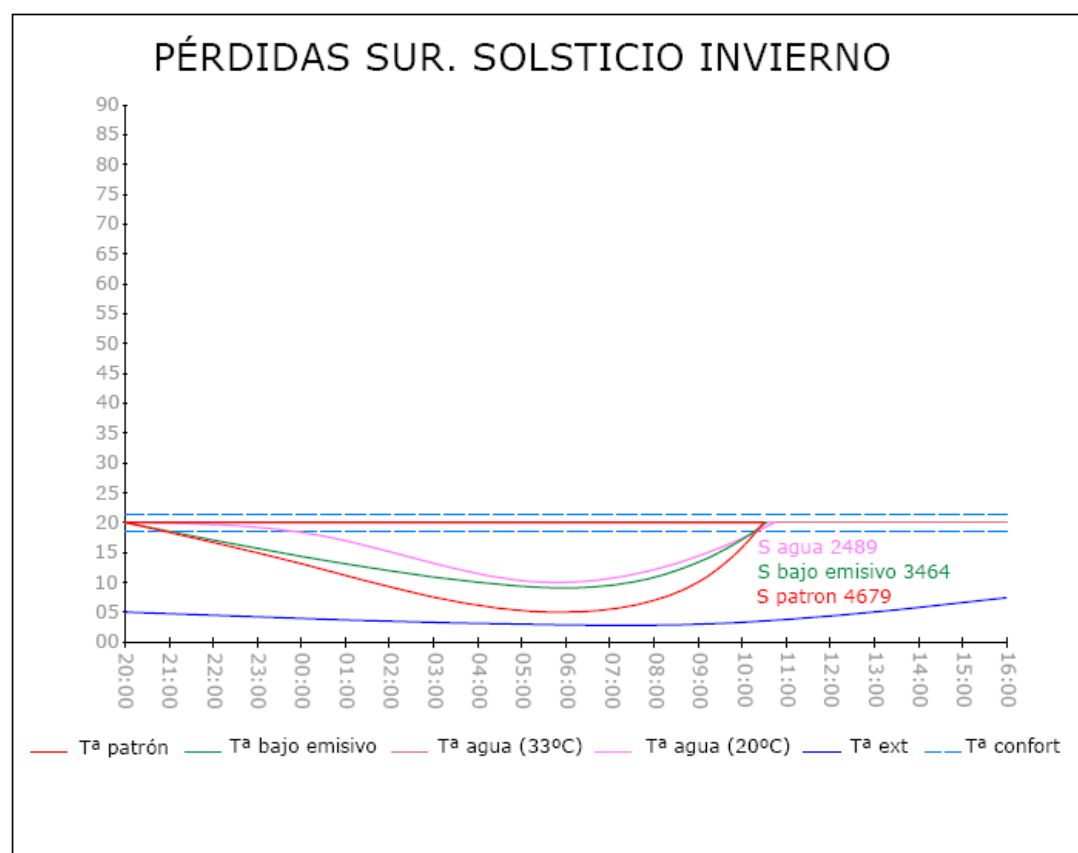
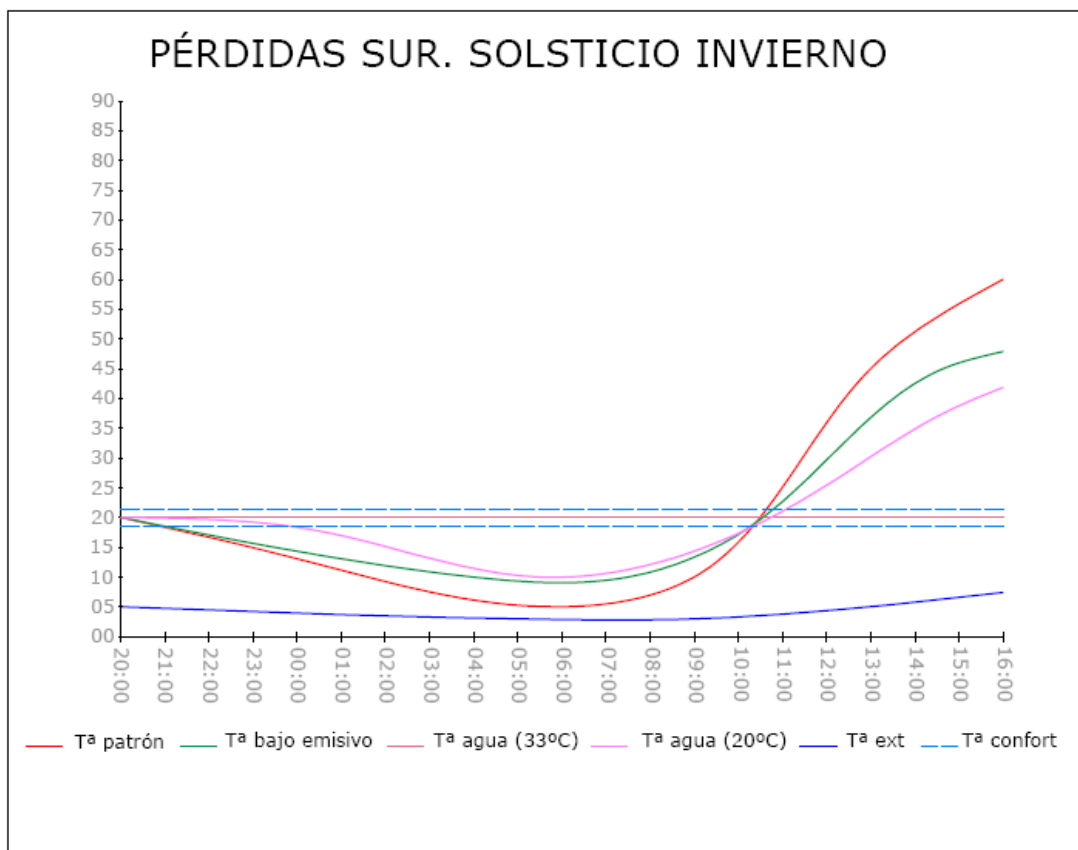
Y dividiendo cada superficie entre la superficie patrón podemos decir que:

$S_{TS-30}/S_{patrón}=0,79$ . 21%

$S_{SS-20}/S_{patrón}=0,60$  40%.

$S_{agua}/S_{patrón}=0,38$ . 62%

- El vidrio TS-30 mejora un 21% con respecto al vidrio patrón en captación, en orientación este.
- El vidrio SS-20 mejora un 40% con respecto al vidrio patrón en captación, en orientación este.
- El vidrio con agua mejora un 62% con respecto al vidrio patrón en captación, en orientación este.



Si:

- S patrón es la superficie englobada por la curva patrón y la recta que proporciona el agua a 33°C (20°C).
- S bajo emisor es la superficie englobada por la curva del vidrio bajo emisor y la recta que proporciona el agua a 33°C (20°C).
- S agua es la superficie englobada por la curva del vidrio del agua a 20°C y la recta que proporciona el agua a 33°C (20°C).

Si la energía perdida por la caja con respecto a la del agua a 20°C es proporcional al área de la curva, entonces:

$$\frac{S_{agua}}{S_{patrón}} < \frac{S_{bajo\ emisor}}{S_{patrón}} = \frac{2489}{4679} < \frac{3464}{4679} = 0,53 < 0,74$$

- El vidrio con agua a 20°C mejora un 21% con respecto al vidrio bajo emisor pérdidas y un 47% con respecto al vidrio patrón.
- El vidrio bajo emisor mejora un 26% con respecto al vidrio patrón.

### 8.3. CONCLUSIONES PARCIALES

- Se ha podido comparar el comportamiento simulado de los vidrios de control solar y bajo emisivos con su comportamiento experimental, encontrando que existe una pequeña falta de precisión en lo relativo a captación, asumiendo los ajustes previos del modelo (mayor aislamiento de las cajas). Sin embargo podría decirse que las simulaciones reproducen adecuadamente el fenómeno.
- Las simulaciones a pérdidas discrepan más acusadamente de los resultados experimentales, siendo más difícil su ajuste. No obstante la descripción cualitativa del fenómeno coincide esencialmente en simulación y ensayos.
- La comprensión profunda del fenómeno aportada por los resultados de simulación y ensayos ha permitido establecer unas curvas ideales de comportamiento de cada tipo de vidrio, lo que ha conducido a realizar una comparación entre el vidrio con agua circulante y vidrios de control solar y bajo emisivos, utilizando como base el vidrio patrón.
- De esta comparación se desprende que es posible tener un mejor comportamiento energético del vidrio con agua circulante tanto frente a vidrios de control solar como bajo emisivos. Esta mejora de comportamiento se aprecia con mucha claridad en lo que respecta a ganancias (22%) ya que el fenómeno es de mayor intensidad que el de las pérdidas. Sin embargo considerando el aprovechamiento del agua precalentada gracias a la captación excedente, se puede estimar una mejora de comportamiento del vidrio con agua circulante con respecto a los bajo emisivos (21%).





## ÍNDICE CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

<b>9. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>343</b>
9.1. CONCLUSIONES GENERALES.....	343
9.2. CONCLUSIONES PARTICULARES .....	343
9.2.1. Proyectuales .....	343
9.2.2. Científicas .....	344
9.2.3. Teóricas .....	344
9.2.4. Metodológicas .....	344
9.2.5. De simulación.....	344
9.2.6. Experimentales.....	345
9.2.7. Tecnológicas .....	345
9.2.8. Industriales.....	345
9.2.9. Normativas .....	346
9.2.10. Profesionales.....	346
9.2.11. Medioambientales .....	346
9.2.12. De ahorro energético.....	346
9.2.13. Económicas.....	347
9.3. PROYECCIÓN DE NUEVOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN .....	348
 <b>CONCLUSIONI E FUTURE LINEE DI RICHERCA .....</b>	 <b>349</b>



## 9. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

### 9.1. CONCLUSIONES GENERALES

- Se ha alcanzado el objetivo principal de la tesis, es decir, que se ha demostrado experimentalmente que se pueden conseguir mejoras en la eficiencia energética de los edificios mediante el uso de un vidrio dinámico del tipo con cámara de agua en circulación.
- La mejora energética se sitúa esencialmente en el campo de la captación solar, permitiendo un control de la misma y un aprovechamiento complementario del calor excedente en ciclo de invierno.
- La investigación realizada ratifica experimentalmente los datos teóricos encontrados en la literatura técnica.
- Se ha comprobado igualmente mediante ensayos que el vidrio con agua circulante en la cámara se comporta como un excelente intercambiador de calor pudiendo eventualmente sustituir a radiadores, suelos radiantes y conductos de aire acondicionado.
- Se ha podido comprobar que en lo relativo a ganancias solares por captación en ciclo de verano se puede alcanzar con el vidrio con agua circulante una reducción superior a la proporcionada por vidrios de control solar, sin perder prácticamente transmisión luminosa, con un consumo ínfimo de energía para la circulación del líquido.
- El mantenimiento de la transparencia permite ahorros en iluminación artificial, optimizando el aprovechamiento de la iluminación natural.
- La utilización del vidrio con cámara de agua circulante amplía la libertad de diseño del arquitecto permitiendo la utilización de grandes superficies acristaladas sin comprometer por ello la eficiencia energética de la envolvente.

### 9.2. CONCLUSIONES PARTICULARES

#### 9.2.1. PROYECTUALES

- Con esta investigación se hace una aportación fundamental en el campo del proyecto arquitectónico, liberando al arquitecto de la necesidad, ineludible en algunos casos, de utilizar elementos de protección exterior o vidrios de control solar. Tanto unos como otros imponen ciertos gravámenes estéticos de los que ahora se ve libre el arquitecto.
- La conservación de la transparencia y la posibilidad razonable de realizar grandes superficies acristaladas son elementos de fluidez espacial requeridos ampliamente por los arquitectos. La utilización de vidrios con agua circulante

en la cámara permite proyectar estas superficies sin penalizar la eficiencia energética del edificio.

#### **9.2.2. CIENTÍFICAS**

- Esta tesis contribuye a la generación del conocimiento en una línea prioritaria como es la eficiencia energética en la arquitectura. Además está en línea con las recomendaciones de la Unión Europea y del Departamento de Energía de los Estados Unidos.
- Con esta investigación se da un paso fundamental en el conocimiento del comportamiento real del vidrio con cámara de agua, estudiado únicamente desde el punto de vista térmico.
- La aportación de un nuevo método de ensayo permite el desarrollo de nuevas investigaciones que ya se están produciendo, como es el caso de los trabajos de Luis A. Alonso Pastor y Belén Pérez Pujazón, Susana Millán y Juan Miguel Lirola, publicados en diversos congresos.
- El presente trabajo ya ha dado lugar a un artículo en una revista indexada en el JCR (DYNA) y proporciona una base adecuada para la publicación de varios artículos más.

#### **9.2.3. TEÓRICAS**

- Desde el punto de vista del comportamiento teórico de diferentes tipos de vidrios en condiciones de servicio se ha descrito con bastante fiabilidad el patrón ideal de los resultados de los ensayos en diferentes condiciones estacionales en Madrid.
- Como aportación adicional se ha podido observar experimentalmente la intensidad del fenómeno de captación solar frente al grado inferior del fenómeno de las pérdidas. Esto podría llevar a que en días de invierno soleados, una adecuada gestión de las ganancias solares podría neutralizar casi por completo las pérdidas nocturnas.

#### **9.2.4. METODOLÓGICAS**

- Afirmación y consolidación de una metodología conjunta de simulación y ensayos físicos que permite alcanzar una comprensión más profunda del fenómeno. A pesar de las dificultades encontradas en la exacta simulación del ensayo, la posibilidad de comparar los resultados de ambos compensa con creces las dificultades encontradas.

#### **9.2.5. DE SIMULACIÓN**

- Se ha puesto a prueba la fiabilidad de dos programas informáticos de simulación con son el Ecotect y el DesignBuilder. Con ello se ha comprobado que el primero contiene ciertos defectos en su algoritmo del cálculo y que el segundo, aunque tiene mayor precisión dista bastante de reproducir con exactitud los resultados de los ensayos físicos.

- No obstante se ha comprobado que al menos el DesignBuilder realiza una descripción cualitativa muy fiable del fenómeno (haciendo salvedad de algunos desfases) lo que permite en su caso avanzar las líneas generales de comportamiento energético de un proyecto arquitectónico.
- Se afirma que es de primer interés realizar un ajuste en los programas de simulación y se aportan datos sobre algunas correcciones a realizar.

#### **9.2.6. EXPERIMENTALES**

- Diseño y realización de un nuevo método de ensayo que reúne las características de gran sencillez, gran economía, que además está inspirado y recoge lo más interesante de experiencias previas. Pero tal vez lo más importante es que trabaja en condiciones reales de intemperie, por lo que su acercamiento a las condiciones reales de servicio de un acristalamiento en la arquitectura es máximo.
- Diseño y ejecución de un prototipo de vidrio con cámara de agua a partir de una unidad de vidrio doble con cámara de aire introduciendo modificaciones en su diseño tales como mejora del sellado con silicona estructural, en la última versión con vidrio laminar 4+4 en las dos caras, e incluso se ha mejorado y optimizado el sistema de llenado y vaciado del vidrio.

#### **9.2.7. TECNOLÓGICAS**

- Con esta tesis se contribuye al diseño y puesta a punto de un nuevo acristalamiento con agua circulante en la cámara. Si bien existen productos comerciales o semi-comerciales en este campo, se aportan mejoras técnicas tales como la recomendación de utilizar vidrio laminar como garantía probada en caso de rotura o la mejora del sellado perimetral para garantizar la estanqueidad.
- Se hace hincapié en la mejora técnica que supondría el control inteligente del fluido circulante en la cámara y se aportan unos primeros resultados sobre sus prestaciones en condiciones de servicio mediante la utilización de algunos dispositivos de regulación. La conclusión es que se puede optimizar mucho la eficiencia energética de este acristalamiento con la implementación y el control de una instalación de apoyo al mismo de cierta complejidad pero sin coste excesivo.

#### **9.2.8. INDUSTRIALES**

- Solicitud de patente de invención sobre una variante del sistema que tiene la particularidad de hacer la impulsión y el retorno de fluido a través del cuerpo de anclajes puntuales especiales que además soportan el panel de vidrio. Esta invención amplía la utilización de este tipo de vidrio al campo del vidrio estructural y abunda en el concepto de transparencia ampliando su uso a sistemas en los que desaparece la carpintería perimetral, aumentando así la transparencia general del conjunto.

#### **9.2.9. NORMATIVAS:**

- Se ponen las bases para que la normativa dé un paso adelante en la exigencia de comprobación de las prestaciones de los acristalamientos en condiciones lo más reales posibles. En este sentido el método de ensayo propuesto puede considerarse precursor de un nuevo método normalizable para la medición efectiva de de las prestaciones energéticas de los acristalamientos.

#### **9.2.10. PROFESIONALES.**

- Se ha explorado en varias aspas la integración en el proceso de trabajo de un equipo de proyecto de los programas de simulación energética, como elemento de comprobación y validación energética del diseño arquitectónico realizado a priori. El aumento futuro de confianza en los resultados de estos programas podría aconsejar su utilización en fases más tempranas de proyecto para el adecuado ajuste del diseño.
- Los estudios energéticos realizados con programas de simulación aportan un argumento adicional en la defensa de propuestas arquitectónicas frente a cualquier tipo de promotores, muy especialmente los de tipo institucional, que encuentran en ello justamente una característica diferencial favorable en la afirmación de una construcción más sostenible.

#### **9.2.11. MEDIOAMBIENTALES**

- Esta investigación realiza una contribución patente en el campo medioambiental al apoyar la mejora de la eficiencia energética de los edificios y más concretamente la de las envolventes. En este sentido se considera una consecuencia del efecto educativo de iniciativas como el concurso Solar Decathlon, cuyo propósito es precisamente el aumento de la conciencia general en a sostenibilidad del planeta, y concretamente en la realización de una arquitectura sostenible.
- La realización y estudio comparado de la eficiencia de la envolvente acristalada en diferentes localizaciones geográficas (España, Italia, EEUU), contribuye a extender la validez de los análisis a una generalidad de emplazamientos. En este sentido el ajuste de las herramientas de simulación proporciona avances muy interesantes.
- La propia realización de esta investigación se ha enfocado con unos consumos energéticos mínimos, dentro de una filosofía de economía de medios versus maximización de resultados. Gran parte de los aparatos utilizados son reciclados (caldera, ventilador automóvil) y el material experimental (cajas de ensayo) se aprovecha en sucesivas investigaciones.

#### **9.2.12. DE AHORRO ENERGÉTICO.**

- Desde el punto de vista del ahorro energético en este trabajo se ha podido constatar que la utilización de vidrio con cámara de agua circulante en la cámara puede ofrecer ahorros importantes en consumo de aire

acondicionado, toda vez que el control y atenuamiento de las ganancias solares excesivas se ha logrado con éxito aprovechando simplemente la libre refrigeración del acristalamiento a temperatura exterior, con un consumo mínimo en la bomba de recirculación.

- En lo relativo a calefacción se ha comprobado experimentalmente que la captación invernal a sur puede producir aumentos de temperatura superiores a los valores de confort. El vidrio con cámara de agua puede aprovechar ese excedente en captación preparando agua caliente como apoyo a la calefacción nocturna. Eso requiere de la utilización de termotanques que mantengan la masa térmica almacenada hasta la noche en que sea requerida. Ente sentido se pueden obtener ciertos ahorros en el consumo de calefacción.
- En el aspecto cualitativo las proyecciones realizadas sugieren que en ciclo diurno de verano se pueden obtener unos ahorros de energía para refrigeración de aproximadamente un 76% en fachadas con orientación oeste y hasta un 62% en fachadas al este, con respecto a un vidrio doble convencional.
- Con respecto a la cuantificación del ahorro posible en energía para calefacción la proyección realiza un ahorro energético máximo por día de 47% con respecto a un vidrio doble convencional.
- La mejora energética lograda en aire acondicionado frente al uso de un vidrio de máximo control solar, es de un 22% en fachadas este y de un 19% en orientación oeste, pero a cambio de tener una imagen diferente (coloración constante) y pérdidas notables en iluminación natural. Ello conllevaría un consumo adicional en iluminación artificial que no se ha calculado pero que tampoco es nulo.
- La mejora energética lograda en calefacción frente al uso de un vidrio bajo emisivo de altas prestaciones es de un 21%. A ello hay que sumar que el vidrio bajo emisivo también reduce los valores de captación solar diurna en invierno, por lo que puede conllevar aumentos en el consumo de calefacción, sobre todo en el comienzo del día.
- Probablemente este sistema también podría hacer un aprovechamiento directo de agua a baja temperatura procedente de una instalación solar térmica, optimizando de este modo el rendimiento energético de la misma.

### **9.2.13. ECONÓMICAS**

- Sobre la viabilidad económica de la utilización del vidrio con cámara de agua circulante hay que señalar que tomando en consideración que este sistema sustituye a radiadores, suelo radiante o conducciones de aire acondicionado, hay un primer argumento sobre la amortización de su instalación, por sustitución de otras instalaciones de climatización.
- Otro argumento a favor es que tanto vidrios de control solar como de baja emisividad suponen un sobre coste con respecto a un vidrio doble convencional.

- Finalmente los ahorros energéticos observados tanto en aire acondicionado como en calefacción suponen mejoras de mayor cuantía con respecto al vidrio doble convencional y de menor cuantía (pero positivas) con respecto a vidrios de control solar y bajo emisivos, si bien como ya se ha comentado estos últimos imponen ciertos gravámenes.
- En consecuencia haciendo balance de ventajas (ahorro energético, coste comparativo, sustitución parcial de instalaciones) y de sus inconvenientes (coste inicial elevado, necesidad de instalación de apoyo) podría consecuentemente afirmarse su viabilidad económica, siempre y cuando su producción alcance una escala comparable a la de los otros tipos citados.
- Si bien parece probable su viabilidad económica matemática, existen netamente a su favor argumentos ya citados como son la transparencia y el ahorro de energía efectivo que suponen mejoras discutibles desde el punto de vista arquitectónico y de sostenibilidad.

### 9.3. PROYECCIÓN DE NUEVOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN:

- Esta tesis ha proporcionado la oportunidad de desarrollar nuevos trabajos de investigación que dan continuidad a la iniciada y que se despliegan en los campos del control domótico de la instalación de apoyo al vidrio con agua circulante, del estudio de simulación de transferencias térmicas en los acristalamientos mediante modelos a escala y la propuesta de un nuevo sistema de cerramiento transparente/translúcido de alta eficiencia energética y forma libre. Estas tres líneas ya han dado lugar a publicaciones y comunicaciones a congresos, y una de ellas ya cuenta con título de tesis aprobado, mientras que las otras dos seguirán el mismo camino en breve plazo.
- De modo complementario se plantea la posibilidad aún no explorada de realizar nuevas investigaciones en aspectos tales como: Desarrollo de líquidos especiales caloportadores; Gestión de una inercia general de la casa a través del cerramiento con cámara de agua; Análisis energético de vidrio fotovoltaico; Precisión de los programas de simulación.



## CONCLUSIONI E FUTURE LINEE DI RICERCA

### CONCLUSIONI GENERALI

- Si è raggiunto l'obiettivo principale della tesi, cioè, che si è dimostrato sperimentalmente che si possono ottenere miglioramenti nella efficienza energetica degli edifici attraverso l'uso di un vetro dinamico del tipo con camera d'acqua in circolazione.
- Il miglioramento energetico si apprezza principalmente nel campo del guadagno solare, permettendo il controllo della stessa ed un uso complementare del calore in ciclo invernale
- La ricerca conferma sperimentalmente i dati teorici presenti nella letteratura scientifica.
- È stata anche controllata attraverso test che il vetro con l'acqua circolante nella camera si comporta da un eccellente scambiatore di calore potendo eventualmente sostituire i radiatori, il riscaldamento a pavimento e i condotti dell'aria condizionata.
- È stato dimostrato che, in termini di guadagni solari a captazione in ciclo di estate si può raggiungere con il vetro con l'acqua circolante una riduzione superiore a quella fornita dai vetri a controllo solare, senza perdere praticamente trasmissione luminosa, con un consumo minimo di energia per la circolazione del liquido.
- La manutenzione della trasparenza permette un risparmio dell'illuminazione artificiale, ottimizzando l'uso dell'illuminazione naturale.
- L'uso del vetro con camera d'acqua circolante estende la libertà di progettazione architettonica consentendo l'utilizzo di ampie superfici vetrate, senza compromettere l'efficienza energetica delle stesse.

### CONCLUSIONI PARTICOLARI

#### 9.3.1. PROGETTUALI

- Questa ricerca fornisce un contributo fondamentale nel campo della progettazione architettonica, liberando l'architetto dalla necessità, ineludibile in alcuni casi, di utilizzare elementi di protezione esterna o vetri a controllo solare. Entrambi i gruppi impongono determinati tributi estetici di cui ora l'architetto è libero.
- La conservazione di trasparenza e la possibilità ragionevole di realizzare grandi superfici di vetro sono elementi di fluidità spaziale richiesti ampiamente dagli architetti. L'utilizzo dei vetri con acqua circolante nella vetrocamera permette progettare queste superfici senza penalizzare l'efficienza energetica dell'edificio.

### **9.3.2. CIENTIFICHE**

- Questa tesi contribuisce alla produzione scientifica in una linea di priorità come è l'efficienza energetica nell'architettura. E' inoltre in linea con le raccomandazioni dell'Unione Europea e il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DOE).
- Questa ricerca è un passo fondamentale nella conoscenza del comportamento reale del vetro con camera ad acqua, studiato soltanto dal punto di vista termico.
- Il contributo del nuovo metodo di test permette lo sviluppo di nuove ricerche già in corso, come e' il caso dei lavori di Luis A. Pastor e Belen Pérez Pujazón, Susana Millan y Juan Miguel Lirola, pubblicati ormai in diversi convegni.
- Questo lavoro ha già portato un articolo in una rivista indicizzata nel JCR (DYNA) e fornisce una base adeguata per la pubblicazione di diversi articoli.

### **9.3.3. TEORICHE**

- Dal punto di vista del comportamento teorico di diversi tipi di vetro in condizioni di servizio è stato descritto in modo abbastanza affidabile il modello ideale dei risultati dei test in differenti condizioni stagionali a Madrid.
- Come un contributo addizionale è stato osservato sperimentalmente l'intensità del fenomeno di guadagno solare contro il livello più basso del fenomeno delle perdite. Questo potrebbe portare al fatto che in giornate invernali di sole, un'adeguata gestione dei guadagni solari potrebbe neutralizzare quasi interamente le perdite notturne.

### **9.3.4. METODOLOGICHE**

- L'affermazione e il consolidamento di una metodologia comune di simulazione e di test sperimentali che permette raggiungere una comprensione più profonda del fenomeno. Nonostante i problemi incontrati nella simulazione accurata del test, la possibilità di confrontare i risultati di entrambi supera di gran lunga le difficoltà incontrate.

### **9.3.5. DI SIMULAZIONE**

- Si è verificato l'affidabilità di due programmi informatici di simulazione energetica, Ecotect e DesignBuilder. Si è dimostrato che il primo contiene alcuni difetti dell'algoritmo di calcolo e che il secondo, anche se è molto più preciso, e' ancora lontano di riprodurre con precisione i risultati dei test fisici.
- Tuttavia è stato dimostrato che almeno DesignBuilder realizza una descrizione qualitativa molto affidabile del fenomeno (con alcune lacune

però), che consente ulteriormente di mandandare avanti le linee generali del comportamento energetico di un progetto architettonico.

- Si afferma che e' di primo interesse realizzare degli aggiustamenti nei programmi di simulazione, e si forniscono dati sulle alcune delle correzioni da fare.

#### **9.3.6. ESPERIMENTALI**

- Progettazione e realizzazione di un nuovo metodo di test che soddisfi le caratteristiche di grande semplicità, grande economia a cui e' ispirato. Raccoglie inoltre le più interessanti delle esperienze precedenti. Tuttavia la parte più importante è il lavoro in condizioni reali all'aperto, essendo massimo l'approccio alle condizioni reali di servizio di una vetrata.
- Progettazione e realizzazione di un prototipo con camera d'acqua circolante a partire da una unità di vetrocamera d'aria, introducendo modifiche nel suo disegno, ad esempio il miglioramento della sigillatura con silicone strutturale e, nell'ultima versione, l'uso di un vetro stratificato 4 +4 su entrambi i lati e il sistema di riempimento del vetro.

#### **9.3.7. TECNOLOGICHE**

- Con questa tesi si contribuisce alla progettazione e allo sviluppo di un nuovo vetro con acqua circolante nella camera. Mentre prodotti commerciali o semi-commerciali in questo campo forniscono miglioramenti tecnici come ad esempio la raccomandazione di utilizzare il vetro stratificato testato come garanzia in caso di rottura o il miglioramento della guarnizione perimetrale per garantire la staticità.
- Si sottolineano i miglioramenti tecnici, ovvero il controllo intelligente del fluido circolante nella camera e si forniscono i primi risultati delle sue prestazioni, in condizioni di servizio, attraverso l'uso di alcuni dispositivi di controllo. La conclusione è che questi miglioramenti possono aumentare notevolmente l'efficienza energetica con questo tipo di vetro attraverso l'implementazione e il monitoraggio di un impianto di appoggio di una certa complessità, ma senza costi eccessivi.

#### **9.3.8. INDUSTRIALI**

- Richiesta di un brevetto su una variante del sistema che ha la particolarità di avere l'emissione e il ritorno del fluido attraverso il corpo di punti di ancoraggio speciali che in più sostengono il pannello di vetro. Questa invenzione estende l'utilizzo di questo tipo di vetro al campo del vetro strutturale e si basa sul concetto di trasparenza estendendo l'uso a sistemi in cui scompare il telaio perimetrale, aumentando in tal modo la trasparenza generale del tutto.

#### **9.3.9. NORMATIVE**

- Si pongono le basi perche la legislazione faccia un passo in avanti nella esigenza di valutazione delle prestazioni delle vetrate in condizioni il più realistiche possibile. In questo senso, il metodo proposto può essere considerato un precursore di un nuovo metodo standardizzato per la misurazione efficace delle prestazione energetiche dei vetri.

#### **9.3.10. PROFESSIONALI**

- E 'stato esplorato in diversi casi l'integrazione nel processo di lavoro di un team di progetto di programmi di simulazione energetica, come elemento di verifica e validazione del disegno architettonici fatto a priori. L'aumento futuro di fiducia nei risultati di questi programmi potrebbe consigliare il suo utilizzo nelle prime fasi di progettazione per una direzione corretta del disegno.
- Gli studi energetici realizzati con programmi di simulazione energetica forniscono un ulteriore argomento in difesa delle proposte architettoniche contro qualsiasi tipo di promotori, soprattutto istituzionali, che trovano una caratteristica differenziale favorevole nell'affermazione di una costruzione più sostenibili .

#### **9.3.11. MEDIOAMBIENTALI**

- Questa ricerca è un chiaro contributo al campo medio-ambientale per il sostegno del miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici e più specificamente le vetrate. A questo proposito si considera una continuazione della struttura educativa di iniziative come il concorso Solar Decathlon, il cui scopo è proprio l'aumento della consapevolezza generale della sostenibilità del pianeta, e in particolare della realizzazione di una architettura sostenibile.
- Lo studio comparativo delle prestazioni e l'efficienza dell'involucro di vetro in diverse località geografiche (Spagna, Italia, U.S.A.), contribuisce a prolungare la validità delle analisi a un più ampio numero di siti. In questo senso la taratura degli strumenti di simulazione presuppone ad alcuni sviluppi molto interessanti.
- La stessa realizzazione di questa ricerca è focalizzata alla ricerca minimo consumo energetico, all'interno di una filosofia di economia di mezzi contro la massimizzazione dei risultati. Gran parte delle attrezzature utilizzate sono riciclate (caldaia, ventilatore d'automobile) e sperimentali (casce dei test), sono stati utilizzati nelle indagini e ricerche successive.

#### **9.3.12. DI RISPARMIO ENERGETICO**

- Dal punto di vista del risparmio energetico in questa ricerca è stato dimostrato che l'uso di vetro con acqua circolante nella camera e' in grado di fornire notevoli risparmi nel consumo di energia per l'aria condizionata, in quanto il controllo e la regolazione dei guadagni solari eccessivi sia riuscito

con esito positivo sfruttando semplicemente il "free cooling" del vetro a temperatura ambiente, con un consumo minimo della pompa di ricircolazione

- Per quanto riguarda il riscaldamento è stato dimostrato sperimentalmente che i guadagni solari invernali a sud possono produrre un aumento della temperatura sopra i valori di comfort. Il vetro con camera d'acqua può sfruttare l'eccesso di temperatura come appoggio al riscaldamento durante la notte. questo richiede l'uso di scaldabagni in grado di mantenere la massa termica accumulata fino che sia necessaria durante la notte. In questo senso si può ottenere un qualche risparmio nel consumo di riscaldamento.
- Nell' aspetto qualitativo delle proiezioni realizzate viene indicato che, nel ciclo diurno d' estate, si può ottenere un risparmio energetico di raffreddamento di circa il 76% in vetrate con orientamento ovest e fino al 62% nelle facciate ad est, rispetto ad un vetrocamera convenzionale.
- Per quanto riguarda la quantificazione del possibile risparmio di energia per il riscaldamento la proiezione realizza un massimo risparmio energetico giornaliero del 47% rispetto alle tradizionali vetrocamere.
- Il miglioramento energetico conseguito in aria condizionata rispetto all'utilizzo di un vetro di massimo controllo solare è del 22% in vetrate ad est e del 19% nei casi di orientamento ad ovest; ma avendo sempre una immagine diversa (colorazione costante) e notevoli perdite in illuminazione naturale. Ciò comporterebbe un ulteriore consumo addizionale di illuminazione artificiale, che non è stato calcolato, ma non è nullo.
- Il miglioramento energetico conseguito in riscaldamento rispetto all' utilizzo di vetro basso emissivo di elevate prestazioni è del 21%. A questo si deve aggiungere che il vetro basso emissivo riduce anche i livelli guadagno solare diurno in inverno e può portare ad un aumento nei consumi di riscaldamento, specialmente all'inizio della giornata.
- Probabilmente questo sistema potrebbe anche funzionare con un uso diretto dell'acqua a bassa temperatura preceduta da un sistema di riscaldamento solare, ottimizzando così l'efficienza energetica di esso.

### 9.3.13. ECONOMICHE

- Sulla fattibilità economica dell'utilizzo del vetro con camera d'acqua circolante si deve sottolineare che, tenendo in considerazione che questo sistema sostituisce ai radiatori, ai termopavimenti o condotti di aria condizionata, c'è un primo sconto sulla ammortizzazione dell'impianto, per la sostituzione di altri impianti di climatizzazione.
- Un altro argomento a favore è che entrambi i vetri a controllo solare e bassa emissività rappresentano un sovraccosto rispetto ad una vetrocamera convenzionale.
- Infine, i risparmi energetici osservati sia verso l'aria condizionata che verso il riscaldamento sono miglioramenti di maggiore quantità con rispetto alle

tradizionali vetrocamere e di minore quantità (ma positive) per i vetri a controllo solare e basso emissivi, anche se questi, come già detto, quest'ultimi impongono determinate gravosità.

- In conseguenza, mettendo sulla bilancia benefici (risparmio energetico, confronto dei costi, la sostituzione parziale degli impianti) e svantaggi (costi iniziali elevati, i requisiti di installazione di supporto), si può quindi confermare la loro convenienza economica, a condizione che la loro produzione raggiunga una scala comparabile a quella degli altri tipi menzionati.
- Anche se sembra probabile la fattibilità economica matematica, ci sono chiaramente argomenti a favore già citati come la trasparenza ed il risparmio di energia effettivo i quali sono miglioramenti da discutere dal punto di vista architettonico e della sostenibilità.

#### PROGETTAZIONE DI NUOVI LAVORI DI RICERCA.

- Questa tesi ha fornito l'opportunità di sviluppare nuove ricerche che danno continuità alle ricerche in ambiente che sono dispiegate nel campo del controllo domotico degli impianti a supporto del vetro con acqua circolante. Inoltre contribuisce allo studio di simulazione dei trasferimenti termici nelle vetrate utilizzando modelli a scala e il sistema proposto di un nuovo sistema di chiusura trasparente / traslucido di elevata efficienza energetica efficiente e forma libera. Queste tre linee hanno già portato a pubblicazioni e convegni e una di loro ha già approvato titolo di tesi, mentre gli altri due seguiranno la stessa strada a breve.
- Possiamo aggiungere che si cerca la possibilità, ancora non esplorata, di fare ulteriori ricerche in settori come: lo sviluppo fluidi speciali portatori di calore; Gestione di una inerzia generale della casa attraverso i vetri con camera d'acqua; analisi energetica dei vetri fotovoltaici, precisione dei programmi si simulazione.

INDICE    CAPÍTULO    10.    REFERENCIAS    Y  
BIBLIOGRAFÍA.

<b>10. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>357</b>
10.1. REFERENCIAS .....	357
10.2. BIBLIOGRAFÍA .....	360
10.2.1. ARTÍCULOS.....	360
10.2.2. LIBROS .....	363
10.2.3. PONENCIAS PUBLICADAS EN CONGRESOS .....	365
10.2.4. TESIS DOCTORALES.....	366
10.2.5. REVISTAS .....	367





## 10. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

### 10.1. REFERENCIAS

- Acha, C. (2005). *Estudio experimental de las condiciones de confort relacionadas con parámetros higrotérmicos y calidad del aire*. Unpublished Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Alvarez, G., Palacios, M. J., & Flores, J. J. (2000). A test method to evaluate the thermal performance of window glazings. *Applied Thermal Engineering*, 20(9), 803-812.
- Amstock, J. S. (1999). *Manual del vidrio en la construcción*. México: McGraw-Hill.
- Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2010). 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*, 94(2), 87-105.
- Britto Correa, C. (2001). Análisis de la viabilidad y comportamiento energético de la cubierta plana ecológica. Universidad Politécnica de Madrid).
- Chiapale, J. -, Van Bavel, C. H. M., & Sadler, E. J. (1983). Comparison of calculated and measured performance of a fluid-roof and a standard greenhouse. *Energy in Agriculture*, 2, 75-89.
- Chow, T., Li, C., & Lin, Z. (2010). Innovative solar windows for cooling-demand climate. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2), 212-220.
- Cortés Pizano, F. (2001, Enero, 2001). Breve historia de las aplicaciones del vidrio plano en la construcción. *Revista Del Vidrio Plano.*, 61, pp. 10-19. Retrieved from [http://www.fcpcrv.com/images/pdf/articulo\\_vidrio\\_plano\\_2001.pdf](http://www.fcpcrv.com/images/pdf/articulo_vidrio_plano_2001.pdf)
- Cronin, J. P., Gudgel, T. J., & Kennedy, S. R. (1999, Enero. 1999). Electrochromic glazing.vol.2, p.1-9.
- Dickson, A. (2004). Modelling double-skin façades. Department of Mechanical Engineering. University of Strathclyde.). *Tesis*, Retrieved from [http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc\\_2004/dickson.pdf](http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc_2004/dickson.pdf)
- Gimenez Molina, M. C. (2009). Cerramientos de vidrios especiales. Análisis de aplicación en edificios sostenibles. [Smart glazing. Analysis of application in sustainable buildings.] *Dyna*, 84(1), 71-75.
- Gimenez Molina, M. C., & Lauret Aguirregabiria, B. (2008a). Eficiencia energética de la utilización de vidrios especiales en viviendas sostenibles. , *Resumen de las Actas y Jornadas. II Jornadas de Investigación en Construcción*
- Gimenez Molina, M. C., & Lauret Aguirregabiria, B. (2008b). Nuevo método de estudio para el análisis de la eficiencia energética de cerramientos de vidrios especiales en viviendas sostenibles. Madrid. , *Resúmenes de Ponencias II Jornadas de Investigación en la Construcción*

- Giménez Molina, M., & Lauret Aguirregabiria, B. (2009). Experimental study for the analysis of low emissivity and water cooled glazings in sustainable houses. Madrid.
- Grimmer, D. P., McFarland, R. D., & Balcomb, J. D. (1979). Initial experimental tests on the use of small passive-solar test-boxes to model the thermal performance of passively solar-heated building designs. *Solar Energy*, 22(4), 351-354.
- Hensen, J. L. M., & Radošević, M. (2004). Teaching building performance simulation - some quality assurance issues and experiences. Paper presented at the Eindhoven.
- Holman, J. P. (2002). *Heat transfer* (9th ed.). New York etc.: McGraw-Hill.
- Izquierdo Millán, M., Gavira Galocha, M. J., Alfaro, J. A., & Lecuona Neumann, A. (Agosto 2005). Espesor óptimo del aislante térmico para las viviendas de madrid. Paper presented at the , *Actas de las Jornadas. T. II* 1175-1182. Retrieved from <http://digital.csic.es/handle/10261/5865>
- Kraft, A., & Rottmann, M. (2009). Properties, performance and current status of the laminated electrochromic glass of gesimat. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(12), 2088-2092.
- Larnpert, C. M. (June 1995). Chromogenic switchable glazing: Towards the development of the smart window. Paper presented at the *Presented at Window Innovations '95*, Toronto, Canada, June 5-6, 1995,.
- Lee, E., Di Bartolomeo, D., & Selkowitz, S. (2000, Primavera, 2000). Electrochromic window test in U.S. office show promise. *EETD Newsletter*, Retrieved from <http://eetdnews.lbl.gov/n15/EETD5.pdf>
- Lee, E. S., Selkowitz, S. E., Clear, R. D., DiBartolomeo, D. L., Klems, J. H., Fernandes, L. L., et al. (2006a). *Advancement of electrochromic windows* (California Energy Commission ed.). California: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Lee, E. S., Selkowitz, S. E., Clear, R. D., DiBartolomeo, D. L., Klems, J. H., Fernandes, L. L., et al. (2006b). *A design guide for early-market electrochromic windows*. California Energy Commission.: Lawrence Berkeley National Laboratory. Retrieved from <http://www.escholarship.org/uc/item/3mm8j7q1?display=all>
- Maccari, A., & Zinzi, M. (2001). Simplified algorithms for the italian energy rating scheme for fenestration in residential buildings. *Solar Energy*, 69(Supplement 6), 75-92.
- Marino, F. P. R., & Greco, M. (2007). *La certificazione energetica degli edifici e il D. lgs. 192/2005 e 311/2006*. Roma: EPC libri.
- Millán, S. (2008). *Estudio y documentación sobre acristalamientos con cámara de agua, gestión energética y domótica*. Unpublished manuscript.
- Neila González, F. J. (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Madrid: Munilla-Ilería.
- Platzer, W. J. (2003a). *Architectural and technical guidelines- handbook for the use of switchable façades technology*. Freiburg: Fraunhofer Institute for Solar Systems.
- Platzer, W. J. (2003b). Switchable facade technology. energy efficient offices with smart facades. Paper presented at the *ISES Solar World Congress 2003*. Goteborg, Sweden.

- Raicu, A., Wilson, H. R., Nitz, P., Platzer, W., Wittwer, V., & Jahns, E. (2002). Facade systems with variable solar control using thermotropic polymer blends. *Solar Energy*, 72(1), 31-42.
- Robinson, P., & Littler, J. (1993). Advanced glazing: Outdoor test room measurements, performance prediction and building thermal simulation. *Building and Environment*, 28(2), 145-152.
- Rottmann, M. K., A., Häusler, T., & Fischer, U. S., H. (2007). Illuminance measurements and thermal analysis of test rooms equipped with high performance electrochromic glazing. Paper presented at the Finlandia. 340-343.
- Van Bavel, C. H. M., Damagnez, J., & Sadler, E. J. (1981). The fluid-roof solar greenhouse: Energy budget analysis by simulation. *Agricultural Meteorology*, 23, 61-76.
- Ward, G. J., Inkarojrit, V., & Yazdanian, M. (2006). *Advanced of electrochromic windows. A design guide for early-market electrochromic windows* No. CEC-500-2006-052-AT16). Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory. Retrieved from <http://gaia.lbl.gov/btech/papers/59950.pdf>
- Wittwer, V., Datz, M., Ell, J., Georg, A., Graf, W., & Walze, G. (2004). Gasochromic windows. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 84(1-4), 305-314.
- Yoshimura, K., Yamada, Y., Bao, S., Tajima, K., & Okada, M. (2009). Preparation and characterization of gasochromic switchable-mirror window with practical size. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(12), 2138-2142.
- Zinzi, M. (1999). *Caratterizzazione sperimentale di materiali trasparenti innovativi per applicazioni in edilizia*. Unpublished Università degli studi Roma Tre,
- Zinzi, M. (2006). Office worker preferences of electrochromic windows: A pilot study. *Building and Environment*, 41(9), 1262-1273.

## 10.2. BIBLIOGRAFÍA

### 10.2.1. ARTÍCULOS

- Álvarez, G., Palacios, M. J., & Flores, J. J.** (2000). A test method to evaluate the thermal performance of window glazings. *Applied Thermal Engineering*, 20(9), 803-812.
- Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A.** (2010). 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*, 94(2), 87-105.
- Chiapale, J. Van Bavel, C.H.M., & Sadler, E. J.** (1983). Comparison of calculated and measured performance of a fluid-roof and a standard greenhouse. *Energy in Agriculture*, 2, 75-89.
- Chow, T., Li, C., & Lin, Z.** (2010). Innovative solar windows for cooling-demand climate. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2), 212-220.
- Cronin, J. P., Gudgel, T. J., & Kennedy, S.R.** (Enero. 1999). Electrochromic glazing. *vol.2*, p.1-9.
- Fang, Y., Hyde, T., Hewitt, N., Eames, P. C., & Norton, B.** Thermal performance analysis of an electrochromic vacuum glazing with low emittance coatings. *Solar Energy, In Press, Corrected Proof*
- Gimenez Molina, M. C. (2009).** Cerramientos de vidrios especiales. Análisis de aplicación en edificios sostenibles. [Smart glazing. Analysis of application in sustainable buildings.] *Dyna*, 84(1), 71-75.
- Granqvist, C. G., Azens, A., Hjelm, A., Kullman, L., Niklasson, G. A., Rönnow, D., et al.** (1998). Recent advances in electrochromics for smart windows applications. *Solar Energy*, 63(4), P. 199-216.

**Grimmer, D. P., McFarland, R. D., & Balcomb, J. D. (1979).** Initial experimental tests on the use of small passive-solar test-boxes to model the thermal performance of passively solar-heated building designs. *Solar Energy*, 22(4), 351-354.

**Gunde, M. K., Krasovec, U. O., & Platzer, W. J. (2005).** Color rendering properties of interior lighting influenced by a switchable window. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics and Image Science*, 22(3), 416-423.

**Hensen, J. L. M., & Radošević, M. (2004).** Teaching building performance simulation - some quality assurance issues and experiences. Paper presented at the Eindhoven.

**Izquierdo Millán, M., Gavira Galocha, M. J., Alfaro, J. A., & Lecuona Neumann, A.** (Agosto 2005). Espesor óptimo del aislante térmico para las viviendas de madrid. Paper presented at the *Actas de las Jornadas. T. II* 1175-1182. Retrieved from <http://digital.csic.es/handle/10261/5865>

**Jiménez, M. J., Porcar, B., & Heras, M. R. (2008).** Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions. *Solar Energy*, 82(7), 573-587.

**Kraft, A., & Rottmann, M. (2009).** Properties, performance and current status of the laminated electrochromic glass of gesimat. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(12), 2088-2092.

**Lee, E., Di Bartolomeo, D., & Selkowitz, S. (2000, Primavera, 2000).** Electrochromic window test in U.S. office show promise. *EETD Newsletter*, Retrieved from <http://eetdnews.lbl.gov/n15/EETD5.pdf>

**Lee, E. S., Selkowitz, S. E., Clear, R. D., DiBartolomeo, D. L., Klems, J. H., Fernandes, L. L., et al. (2006).** *Advancement of electrochromic windows* (California Energy Commission ed.). California: Lawrence Berkeley National Laboratory.

**Lee, E. S., Selkowitz, S. E., Clear, R. D., DiBartolomeo, D. L., Klems, J. H., Fernandes, L. L., et al. (2006).** *A design guide for early-market electrochromic*

*windows*. California Energy Commission.: Lawrence Berkeley National Laboratory.  
Retrieved from <http://www.escholarship.org/uc/item/3mm8j7q1?display=all>

**Lee, E. S., & Tavit, A.** (2007). Energy and visual comfort performance of electrochromic windows with overhangs. *Building and Environment*, 42(6), 2439-2449.

**Maccari, A., & Zinzi, M.** (2001). Simplified algorithms for the Italian energy rating scheme for fenestration in residential buildings. *Solar Energy*, 69(Supplement 6), 75-92.

**Papaefthimiou, S., Leftheriotis, G., Yianoulis, P., Hyde, T. J., Eames, P. C., Fang, Y., et al.** (2006). Development of electrochromic evacuated advanced glazing. *Energy and Buildings*, 38(12), 1455-1467.

**Piccolo, A., & Simone, F.** (2009). Effect of switchable glazing on discomfort glare from windows. *Building and Environment*, 44(6), 1171-1180.

**Platzer, W. J.** (2003). *Architectural and technical guidelines- handbook for the use of switchable façades technology*. Freiburg: Fraunhofer Institute for Solar Systems.

**Platzer, W. J.** (2003). Switchable facade technology. energy efficient offices with smart facades. Paper presented at the *ISES Solar World Congress 2003*. Goteborg, Sweden.

**Raicu, A., Wilson, H. R., Nitz, P., Platzer, W., Wittwer, V., & Jahns, E.** (2002). Facade systems with variable solar control using thermotropic polymer blends. *Solar Energy*, 72(1), 31-42.

**Robinson, P., & Littler, J.** (1993). Advanced glazing: Outdoor test room measurements, performance prediction and building thermal simulation. *Building and Environment*, 28(2), 145-152.

**Roland Pitts, J., Lee S.H., Jorgensen, G., Deb, S. K., & Czanderna, A. W.**  
*Electrochromic window durability*

**Smith, G. B., Ford, M. J., Masens, C., & Muir, J. (2004).** Energy-efficient coatings in the Nanohouse™ initiative. *Current Applied Physics*, 4(2-4), 381-384.

**Van Bavel, C. H. M., Damagnez, J., & Sadler, E. J. (1981).** The fluid-roof solar greenhouse: Energy budget analysis by simulation. *Agricultural Meteorology*, 23, 61-76.

**Ward, G. J., Inkarojrit, V., & Yazdanian, M. (2006).** *Advanced of electrochromic windows. A design guide for early-market electrochromic windows* No. CEC-500-2006-052-AT16). Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory. Retrieved from <http://gaia.lbl.gov/btech/papers/59950.pdf>

**Wittwer, V., Datz, M., Ell, J., Georg, A., Graf, W., & Walze, G. (2004).** Gasochromic windows. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 84(1-4), 305-314.

**Zinzi, M. (2006).** Office worker preferences of electrochromic windows: A pilot study. *Building and Environment*, 41(9), 1262-1273.

#### 10.2.2. LIBROS

**AAVV. (2007).** *Guía de ahorro y eficiencia energética en oficinas y despachos*. Madrid: Dirección General de Industria, Energía y Minas. Conserjería de Economía y Consumo. Comunidad de Madrid. Retrieved from [www.madrid.org](http://www.madrid.org); [www.fenercom.com](http://www.fenercom.com)

**AAVV. (2007).** *Guía de rehabilitación energética de edificios de viviendas*. Madrid: Dirección General de Industria, Energía y Minas. Conserjería de Economía y Consumo. Comunidad de Madrid. Retrieved from [www.madrid.org](http://www.madrid.org)

**AAVV. Equipo de ahorro de energía en la edificación. (1983).** In Instituto de Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Ed.), *Bases para el diseño solar pasivo*. Madrid:

**Amstock, J. S. (1999).** *Manual del vidrio en la construcción*. México: McGraw-Hill.

**Button, D., & Pye, B. (1993).** *Glass in building : A guide to modern architectural glass performance*. Oxford: Butterworth Architecture.

**Carmody, J. (2004).** *Window systems for high-performance buildings*. New York: W.W. Norton.

**Carmody, J., Selkowitz, S., & Heschong, L.** (2007). *Residential windows : A guide to new technologies and energy performance*. New York: W.W. Norton.

**Compagno, A.** (1999). *Intelligente glASFassaden : Material, anwendung, gestaltung = intelligent glass façades : Material, practice, design* (4. rev. und erw. Aufl ed.). Basel: Birkhauser.

**de Andrés y Rodríguez-Pomatta, Juan Antonio, Aroca Lastra, S., & García Gándara, Manuel.** (1985). *Termotecnia* (2nd ed.). Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.

**Holman, J. P.** (2002). *Heat transfer* (9th ed.). New York etc.: McGraw-Hill.

*Manual del vidrio* (2001). . Madrid: Saint-Gobain Glass.

**Marino, F. P. R., & Greco, M.** (2007). *La certificazione energetica degli edifici e il D. lgs. 192/2005 e 311/2006*. Roma: EPC libri.

**Minguet, J. M., & Bahamón, A.** (2007). *Casas de cristal = casas de vidro*. Barcelona: Monsa.

**Neila González, F. J.** (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Madrid: Munilla-lería.

**Oesterle, E.** (2001). *Double-skin facades integrated planning : Building physics, construction, aerophysics, air-conditioning, economic viability*

**Paolo R. Marino, F., & Griego, M.** (2007). *La certificazione energetica degli edifici. D. Lgs: 192/2005 e 311/2006* (III edición. ed.). Roma: EPC libri. Edilizia Quaderni per la progettazione.

**Scheerbart, P., & Pizza, A.** (1998). *La arquitectura de cristal*. Murcia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia.

**Tucci, F.** *Involucro ben temperato. Efficienza energetica ed ecologica in architettura attraverso la pelle degli edifici*. (2006). Firenze: Alinea Editrice.



**Tucci F.** *Tecnologia e natura. Gli insegnamenti del mondo naturale per il progetto dell'architettura bioclimatica*, (2000). Firenze: Alinea Editrice.

**Yáñez Parareda, G.** (2008). *Arquitectura solar e iluminación natural : Conceptos, métodos y ejemplos*. Madrid: Munilla-Lería.

### 10.2.3. PONENCIAS PUBLICADAS EN CONGRESOS

**Gimenez Molina, M. C., & Lauret Aguirregabiria, B.** (2008). Eficiencia energética de la utilización de vidrios especiales en viviendas sostenibles. , *Resumen de las Actas y Jornadas. II Jornadas de Investigación en Construcción*

**Gimenez Molina, M. C., & Lauret Aguirregabiria, B.** (2008). Nuevo método de estudio para el análisis de la eficiencia energética de cerramientos de vidrios especiales en viviendas sostenibles. Madrid. , *Resúmenes de Ponencias II Jornadas de Investigación en la Construcción*

**Lauret Aguirregabiria, B., & Gimenez Molina, M. C.** (2008). Nuevos métodos de investigación para estudiar el funcionamiento de casas solares: El trabajo con modelos a escala para comprobar la eficiencia energética, los conceptos estructurales y los procesos de montaje/desmontaje. Madrid. , *Resumen de las Actas y Jornadas. II Jornadas de Investigación en Construcción*

**Lauret Aguirregabiria, B., & Gimenez Molina, M. C.** (2008). Nuevos métodos de investigación para estudiar el funcionamiento de casas solares: El trabajo con modelos a escala para comprobar la eficiencia energética; los conceptos estructurales y los procesos de montaje / desmontaje. (Resúmenes de Ponencias II Jornadas de Investigación en la Construcción)

**Giménez Molina, M., & Lauret Aguirregabiria, B.** (2009). Experimental study for the analysis of low emissivity and water cooled glazings in sustainable houses. Madrid. COINVEDI. Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica. U.P.M. Junio 2009.

**Karlsson, J.** (2001). Control system and energy saving potential for switchable windows. Paper presented at the *Proceedings of Seventh International IBPSA Conference*, Rio de Janeiro, Brazil. P. 199-206.

**Larnpert, C. M.** (June 1995).

Chromogenic switchable glazing: Towards the development of the smart window. Paper presented at the *Presented at Window Innovations '95*, Toronto, Canada, June 5-6, 1995.

**Millán, S.** (2008). Estudio y documentación sobre acristalamientos con cámara de agua, gestión energética y domótica. Unpublished manuscript. Trabajo de curso.

**Selkowitz, S.** Integrating advanced façades into high performance buildings. Paper presented at the *Glass Performance Days*. Tampere, Finland, 2007.

#### 10.2.4. TESIS DOCTORALES

**Acha, C.** (2005). *Estudio experimental de las condiciones de confort relacionadas con parámetros higrotérmicos y calidad del aire*. Unpublished Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

**Azzolini, G.** (2008). *La progettazione dei dispositivi per la schermatura dell'irraggiamento solare nei paesi europei a clima mediterraneo*. Unpublished. Dottorato di ricerca in progettazione Ambientale. Università di Roma La Sapienza.

**Bedoya de Frutos, C.** (1985). *Influencia de algunos parámetros de diseño de los acristalamientos en el comportamiento térmico de los edificios*. Unpublished. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

**Britto Correa, C.** (2001). *Análisis de la viabilidad y comportamiento energético de la cubierta plana ecológica*. Unpublished. Universidad Politécnica de Madrid.

**Claudi de Saint Mihiel, A.** (2005). *Superfici Mutevolii. Le Tecnologie Innovative Dei Vetri Cromogenici Per Il Progetto Di Involucro A Prestazioni Variabili*. . Unpublished. Università di Napoli.

**Colombini, I.** (2005). *I sistemi vetrati: Tecnologie ed Innovazioni*. Dottorato di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura e disegno Industriale. Università di Roma La Sapienza.

#### 10.2.5. REVISTAS

**Cortés Pizano, F.** (2001, Enero, 2001).

Breve historia de las aplicaciones del vidrio plano en la construcción. *Revista Del Vidrio Plano.*, 61, pp. 10-19. Retrieved from

[http://www.fcpcrv.com/images/pdf/articulo\\_vidrio\\_plano\\_2001.pdf](http://www.fcpcrv.com/images/pdf/articulo_vidrio_plano_2001.pdf)

**Fernández Arroyo, G.,** Consejo Superior de Investigaciones Científicas, & Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. (1990). *Sol y vidrio*. Madrid: Csic.

**Rodríguez Viqueira, M.** (2000), Vidrio, diseño y tecnología. *Tecnología y Diseño En Las Edificaciones*, Vol. III, Pp. 11 - 32. Retrieved from

<http://www.azc.uam.mx/cyad/procesos/website/grupos/tde/NewFiles/manuelV.III.html>